Vergleichende Beschreibung im Verkehr am Beispiel des differenzierten Stadtschnellbahnverkehrs in Ballungsräumen

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Christian Blome
geboren in Paderborn

von der
Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr. Oliver Schwedes
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Siegmann
Gutachter:	Prof. Dr. Ulrich Alois Weidmann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 9. Oktober 2017

Berlin 2017

Gewidmet meiner Schwester Friederike,
die auch diese Arbeit gerne Korrektur gelesen hätte
und die Fertigstellung nicht mehr erleben durfte.

Danksagungen

Danken möchte ich allen, die meine Arbeit unterstützt und gefördert haben.

Prof. Siegmann danke ich für viel Entfaltungs- und Gestaltungsfreiraum in der Lehre, im Selbststudium und dem Wiederauf- und Ausbau des Eisenbahn-Betriebs- und Experimentierfeldes (www.ebuef.de) an seinem Fachgebiet während und nach meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

Prof. Weidmann danke ich für weise Ratschläge, Ermutigung und die finale Richtungsweisung.

Jens Hebbe, Ulrich Leister, Mikko Linderoos und Per Thorlacius danke ich für Gespräche und Anregungen zu den betrachteten Fallstudien in Berlin, San Francisco, Helsinki und Kopenhagen, die mir sehr weitergeholfen haben.

Meinen (zahlreich promovierten) Kolleginnen und Kollegen bei der IVU Traffic Technologies AG danke ich für die vielen aufmunternden Worte und das Teilen eigener Erfahrungen, die mich über Durststrecken in der Fertigstellung in den letzten Jahren hinweg getröstet haben.

Meinen Eltern danke ich für die stete Förderung und vielfältige Unterstützung - in den Jahren seit Studienbeginn trotz größerer räumlicher Distanz. Ohne die langjährig von ihnen geförderte Frankreich-Affinität, die mir Paris zeitweise eine gefühlte zweite Heimat werden und das dortige Schnellbahnsystem erkunden ließ, wäre diese Arbeit wahrscheinlich nicht entstanden.

Zuletzt gilt mein größter Dank meiner wunderbaren Frau Juliane, die das Leben zwischen meiner Dissertation und unzähligen Dienstreisen, ihrem eigenem Beruf, unserer Familie mit zwei großartigen kleinen Kindern und einem großen Umzug hervorragend managt und mir in vielen Dingen den Rücken freihalten konnte, um diese Arbeit zu Ende zu bringen.

Berlin, im Sommer 2017

Zusammenfassung

Der Öffentliche Personennahverkehr unterliegt zeitlich schwankender Nachfrage. In Zeiten erhöhter Nachfrage wird zur Befriedigung der Verkehrsbedürfnisse das Angebot ausgeweitet. Übliche Mittel dazu sind einerseits der Einsatz von Formationen mit größerer Kapazität, soweit dies systemtechnisch möglich ist, und andererseits eine Verdichtung des Fahrtenangebotes. Diese klassischen Verdichtungsprinzipien werden in vielen Netzen angewendet in mitunter sehr unterschiedlicher Ausprägung. Eine in Stadtschnellbahnsystemen oft vorzufindende Ausprägung ist die Anwendung von Expressfahrten, abschnittsweise oder über längere Strecken.

Vergleiche verschiedener Systeme sind aus verschiedenen Gründen schwierig: Unterschiedliche Randbedingungen machen Vergleiche über Absolutwerte wenig aussagekräftig. Viele Vergleiche scheitern oftmals an der Datenverfügbarkeit. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine umfassende Beschreibungsmethodik erarbeitet, mit der Verkehrssysteme unabhängig von der Verfügbarkeit unternehmerischer Daten und vergleichbar trotz unterschiedlicher Randbedingungen beschrieben werden können. Damit Ausreißer in den jeweils netzweise erhobenen Daten das Gesamtbild nicht verwischen, basiert der Großteil der Vergleiche auf den Medianen. Der eigentliche Vergleich erfolgt in drei Gruppen, die das gesamte Spektrum der Systeme abdecken: Verkehr, Betrieb und Wirtschaftlichkeit. Angewendet wird die Methodik auf sieben ausgewählte Stadtschnellbahnsysteme aus Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich und Kalifornien. Während die europäischen Systeme ganze Netze bilden, wird in Kalifornien ein einzelner Korridor betrachtet. Der Vergleich mit den europäischen Netzen zeigt, dass die Aussagekraft auch bei einzelnen Korridoren gegeben ist.

Die in den Netzen erhobenen Daten zu den ausgearbeiteten Beschreibungskriterien werden auf einer Skala zwischen Minimal- und Maximalwerten über alle Netze mit ihrem Median platziert und der Grad der Differenzierung wird in Polardiagrammen dargestellt. Die gesamte Analyse und Ergebnisdarstellung erfolgt skriptbasiert, so dass die Methodik sehr einfach auf weitere Netze, auch außerhalb des engen Bereichs der Stadtschnellbahnsysteme, angewendet werden kann. Eine weitere Detaillierung der Beschreibung unter Hinzuziehung unternehmensinterner Daten wie konkreten Kostensätzen oder detaillierten Nachfragedaten ist mit geringem Aufwand möglich durch Austausch bzw. Verfeinerung der modular aufgebauten Analyse.

Abstract

Public transport is subject to fluctuating demand. In times of increased demand, the transport offer is extended to satisfy transport needs. The usual instrument for this is on the one hand the usage of longer formations, as far as this is technically possible, and on the other hand a compaction of the transport offers. These classical compression principles are used in many networks in sometimes very different forms. A solution of the problem which is often found in rapid transit systems is the use of express trains, in sections or over longer distances.

Comparisons of different systems are difficult for several reasons: With differing boundary conditions comparisons about absolute values are little meaningful. Many comparisons often fail due to missing data availability. Within the scope of this thesis, a comprehensive description methodology is developed, with which traffic systems can be described independently of the availability of entrepreneurial data and while preserving comparability despite different boundary conditions. In order to avoid the blurring of the overall picture, the majority of the comparisons is based on the medians. The actual comparison is divided into three groups covering the entire range of systems: transport, operation and profitability. The methodology is applied to seven selected urban rapid transit systems of Denmark, Germany, Finland, France and California. While the European systems form entire networks, a single corridor is examined in California. The comparison with European networks shows that there is also a high significance of individual corridors.

The data collected in the networks on the specified descriptive criteria are placed on a scale between minimum and maximum values for all networks with their median, and the degree of differentiation is displayed in polar diagrams. The entire analysis and the presentation of results are scripted so that the methodology can very easily be applied to other networks, even outside the narrow range of urban rapid transit systems. Further detailing of the description with the inclusion of company-internal data such as concrete cost rates or detailed demand data is easily possible by exchanging or refining the modular analysis.

Resumé

Les transports en commun sont soumis aux fluctuations temporaires de la demande. En période de demande accrue, l'offre est renforcée pour répondre aux besoins de transport. Une possibilité répandue est l'utilisation de formations de plus grande capacité, dans la mesure où cela est techniquement possible. D'autre part, le renforcement se fait par une augmentation des étapes de trains. Ces principes de renforcement classiques se trouvent en différentes manifestations dans beaucoup de systèmes. Un moyen dans les systèmes de transport urbain rapide est l'application des missions express dans les sections ou sur des distances plus longues.

La comparaison des différents systèmes est difficile pour plusieurs raisons: Différentes contraintes empêchent de faire des comparaisons entre les valeurs absolues. De nombreuses comparaisons échouent souvent en raison de la disponibilité des données. Dans cette thèse, une méthodologie de description complète est élaborée, avec laquelle des systèmes de transport peuvent être décrits indépendamment de la disponibilité des données d'entreprise et tout en assurant la comparabilité malgré des conditions différentes. Pour éviter un poids trop fort des valeurs aberrantes, la majorité des comparaisons se fait sur la base des valeurs médianes. La comparaison réelle est divisée en trois groupes, qui couvrent la gamme complète de systèmes: l'offre de transport, l'exploitation et l'efficacité économique. La méthodologie est appliquée sur sept systèmes de transport en commun de différentes régions sélectionnées au Danemark, en Allemagne, en Finlande, en France et en Californie. Alors que les systèmes européens sont des réseaux entiers, en Californie, un seul couloir est considéré. La comparaison avec les autres réseaux montre que la signification est en grande partie également donnée dans un seul couloir.

Les données recueillies dans les réseaux aux critères de description élaborés sont placés sur une échelle entre les valeurs minimales et maximales de tous les réseaux avec leur médiane et le degré de différenciation est illustré dans les diagrammes polaires. Scripting est fait pour toute l'analyse et la présentation des résultats, de sorte que la méthode peut être appliquée facilement à d'autres réseaux, même en dehors de la gamme étroite des systèmes de transport en commun rapide. L'affinement de l'analyse à l'aide d'informations internes d'entreprise, tels que les taux de coûts spécifiques ou des données de la demande détaillée, est facilement possible par l'échange ou l'affinement de l'analyse modulaire.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ii

Inhaltsverzeichnis v

Abbildungsverzeichnis viii

Tabellenverzeichnis xviii

Abkürzungsverzeichnis xxi

1 Einleitung 1

1.1 Themenstellung 1

1.2 Ziele der Arbeit und Abgrenzung des Themas 2

1.3 Aufbau der Arbeit 4

1.4 Methodisches Vorgehen 5

2 Grundlagen und Rahmenbedingungen 9

2.1 Politische und organisatorische Rahmenbedingungen 9

2.2 Verkehrsplanung 11

2.2.1 Der Planungsprozess von Verkehrsleistungen 11

2.2.2 Anlässe und Methoden zur Anpassung der Planung von Verkehrsleistungen 13

3 Beschreibung und Vergleich von Verdichtungsprinzipien in Schnellbahnnetzen 16

3.1 Vergleichsmethode 16

3.2 Vergleichssparameter 18

3.2.1 Verkehrliche Beschreibung 19

3.2.1.1 Platzangebot 19

3.2.1.2 Anzahl der Stationshalte 22

3.2.1.3 Verteilung der Zugfahrten 23

3.2.1.4 Verteilung des Platzangebotes 27

3.2.1.5 Attraktivitätsindex 28
3.2.1.6 Reisezeiten 30
3.2.1.7 Bedeutung von Umsteigezwängen 36
3.2.1.8 Zwischenfazit: Verkehrliche Beschreibung 38
3.2.2 Betriebliche Beschreibung 39
3.2.2.1 Endstellen und Zwischenendstellen 39
3.2.2.2 Anzahl der Gleise pro Strecke 40
3.2.2.3 Höchstgeschwindigkeit 40
3.2.2.4 Fahrten entgegen der Lastrichtung 41
3.2.2.5 Anzahl der Zugfahrten 42
3.2.2.6 Ausprägung von Expressfahrten 42
3.2.2.7 Zugstärkenänderung 47
3.2.2.8 Streckenbelastung 48
3.2.2.9 Zugbeeinflussung 49
3.2.2.10 Fahrtlänge 50
3.2.2.11 Länge der Hauptverkehrszeit 51
3.2.2.12 Zwischenfazit: Betriebliche Beschreibung 52
3.2.3 Wirtschaftliche Beschreibung 53
3.2.3.1 Erlöse im Eisenbahnbetrieb 54
3.2.3.2 Kosten zur Trassenbenutzung 57
3.2.3.3 Kosten zur Stationsbenutzung 58
3.2.3.4 Aufwand für Leerfahrten 60
3.2.3.5 Personalaufwand 60
3.2.3.6 Fahrzeugkosten 61
3.2.3.7 Energiekosten 63
3.2.3.8 Zwischenfazit: Wirtschaftliche Beschreibung 67
3.3 Zusammenfassung und Darstellung der Vergleichskriterien 69
3.3.1 Ermittlung und Skalierung der Vergleichskriterien 69
3.3.2 Darstellung der Vergleichskriterien 70

4 Analyse von Verdichtungsprinzipien in ausgewählten Schnellbahnnetzen 76
4.1 S-Bahn Berlin 77
4.2 S-Bahn Hannover 93
4.3 Nahverkehr im Großraum Helsinki 105
4.4 DSB S-tog Kopenhagen 119
4.5 S-Bahn München 132
4.6 Réseau Express Régional im Großraum Paris 146

4.7 Caltrain San Francisco 162

5 Klassifizierung und Vergleich der vorgestellten Systeme 174
5.1 Verkehrliche Klassifizierung 174
5.1.1 Attraktivität 174
5.1.2 Verkehrliche Differenzierung 181
5.1.3 Exkurs: Fahrgastinformation 188
5.2 Betriebliche Klassifizierung 191
5.2.1 Infrastruktur 191
5.2.2 Belastung 195
5.2.3 Komplexität 198
5.3 Wirtschaftliche Aspekte 207
5.3.1 Erlöse 207
5.3.2 Kosten 208
5.4 Zusammenfassung 213
5.4.1 Aussagekraft bei Betrachtung eines einzelnen Korridors 213
5.4.2 Ausprägungen der Differenzierung 215
5.4.3 Erkenntnisse aus der Klassifizierung 218

6 Fazit, Schlussfolgerungen und Ausblick 222

Literaturverzeichnis 225

Anhang A-1

A Diagramme zu den vorgestellten Systemen A-2
A.1 S-Bahn Berlin A-2
A.2 S-Bahn Hannover A-16
A.3 Nahverkehr im Großraum Helsinki A-23
A.4 DSB S-tog Kopenhagen A-27
A.5 S-Bahn München A-33
A.6 Réseau Express Régional im Großraum Paris A-46

B Programmcode und Datenbankstruktur A-57
B.1 MySQL A-57
B.2 PHP A-58

Abbildungsverzeichnis

1.3.1 Aufbau der Arbeit 4
1.4.1 Datenfluss der Auswertung 7

2.2.1 Grundstruktur des Netzmanagements 12
2.2.2 Grundmuster der Verkehrsevolution 14

3.2.1 Mögliche Taktraster auf einem Modellkorridor mit Expressbedienung und Verstärkerfahrten 24
3.2.2 Subjektive Einschätzung der Reisezeit für ÖPNV und MIV 33
3.2.3 Skip-Stop-Bedienung 46
3.2.4 Expressbedienung 46
3.2.5 Zonenbedienung 46
3.2.6 Auslastung von Zügen bei unterschiedlicher Struktur des Ballungsraumes 51
3.2.7 Fahrspiel im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm 65
3.3.1 Liniennetzplan des Beispiels Lummerland 70
3.3.2 Betriebliche Vergleichsparameter des Beispiels Lummerland 71
3.3.3 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast des Beispielnetzes von Fotoatelier Ärmel nach Lummerland Hbf 72
3.3.4 Quotienten für die Beispielstrecke Lukashausen - Lummerland Hbf . . 73
3.3.5 Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten auf der Insel Lummerland 74
3.3.6 Beispielhafte Zusammenfassung der zusammengestellten Vergleichsquotienten zu Platzangebot, Zugfahrten und Stationshalten auf der Insel Lummerland 74

4.1.1 Liniennetzplan der S-Bahn Berlin 78
4.1.2 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem nördlichen Ast der Berliner S-Bahn-Linie 1 81
4.1.3 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem östlichen Ast der Berliner S-Bahn-Linie 5 82

4.1.4 Fahrgastverteilung auf die Zuggruppen am Beispiel der Berliner S-Bahnlinie 5 . . . 83
4.1.5 Quotienten auf dem Ast Königs Wusterhausen - Berlin Südkreuz in der HVZ . . . 84
4.1.6 Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei der S-Bahn Berlin . . . 85
4.1.7 Verkehrliche Vergleichsparameter S-Bahn Berlin . . . 86
4.1.8 Betriebliche Vergleichsparameter S-Bahn Berlin . . . 87
4.1.9 Wirtschaftliche Vergleichsparameter S-Bahn Berlin . . . 88
4.2.1 Liniennetzplan der S-Bahn Hannover (ohne HVZ-Expresslinien) . . . 94
4.2.2 Quotienten auf dem Ast Paderborn - Hannover . . . 95
4.2.3 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Paderborn - Hannover in der HVZ . . . 96
4.2.4 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Celle - Hannover in der HVZ . . . 96
4.2.5 Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei der S-Bahn Hannover . . . 97
4.2.6 Verkehrliche Vergleichsparameter S-Bahn Hannover . . . 100
4.2.7 Betriebliche Vergleichsparameter S-Bahn Hannover . . . 101
4.2.8 Wirtschaftliche Vergleichsparameter S-Bahn Hannover . . . 102
4.3.1 Liniennetzplan Helsinki . . . 105
4.3.2 Quotienten im grünen Korridor des Nahverkehrs Helsinki . . . 109
4.3.3 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast nach Vantaankoski in der HVZ . . . 109
4.3.4 Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten in Helsinki . . . 111
4.3.5 Fahrtengefüge stadteinwärts im blauen Korridor in Helsinki in der morgendlichen Hauptverkehrszeit (HVZ) . . . 112
4.3.6 Fahrtengefüge stadteinwärts im grünen Korridor in Helsinki in der morgendlichen HVZ . . . 112
4.3.7 Verkehrliche Vergleichsparameter Nahverkehr im Großraum Helsinki . . . 113
4.3.8 Betriebliche Vergleichsparameter Nahverkehr im Großraum Helsinki . . . 114
4.3.9 Wirtschaftliche Vergleichsparameter Nahverkehr im Großraum Helsinki 115
4.4.1 Liniennetzplan von DSB S-tog Kopenhagen . . . 120
4.4.2 Netzgrafikausschnitt Hillerød - Svanemøllen stadteinwärts . . . 122
4.4.3 Fahrgastzahlen Hillerød - Svanemøllen . . . 122

4.4.4 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Hillerød - Nørreport in der HVZ 123
4.4.5 Quotienten auf dem Ast Hillerød - Nørreport in der HVZ 124
4.4.6 Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei DSB S-tog Kopenhagen 125
4.4.7 Verkehrliche Vergleichsparameter DSB S-tog Kopenhagen 127
4.4.8 Betriebliche Vergleichsparameter DSB S-tog Kopenhagen 128
4.4.9 Wirtschaftliche Vergleichsparameter DSB S-tog Kopenhagen 129
4.5.1 Liniennetzplan der S-Bahn München 133
4.5.2 Bildfahrplanausschnitt des Korridors Erding - Markt Schwaben - München Ostbahnhof für stadteinwärts fahrende Züge zwischen 06:40 und 07:10 Uhr 136
4.5.3 Quotienten für den östlichen Ast der S2 der S-Bahn München 136
4.5.4 Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei der S-Bahn München 137
4.5.5 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast ab Wolfratshausen der Münchener S-Bahn in der HVZ 139
4.5.6 Verkehrliche Vergleichsparameter S-Bahn München 140
4.5.7 Betriebliche Vergleichsparameter S-Bahn München 141
4.5.8 Wirtschaftliche Vergleichsparameter S-Bahn München 142
4.6.1 Liniennetzplan der RER-Linien A, B und E in Paris 146
4.6.2 Quotienten auf dem Ast Aéroport Charles de Gaulle 2 TGV - Châtelet-les-Halles in der HVZ 148
4.6.3 Skip-Stop-Bedienung auf dem Ast der RER-Linie A von Marne-la-Vallée in der morgendlichen HVZ 149
4.6.4 Durchschnittliche Anzahl Einsteiger pro Tag sowie Halte pro zehn Minuten in Lastrichtung an den Stationen des Astes Marne-la-Vallée der Pariser RER-Linie A 150
4.6.5 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast St-Germain-en-Laye - Châtelet-les-Halles in der HVZ 151
4.6.6 Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei der RER Paris 152
4.6.7 Verkehrliche Vergleichsparameter RER-Linien A, B und E in Paris . . 156
4.6.8 Betriebliche Vergleichsparameter RER-Linien A, B und E in Paris . . . 157
4.6.9 Wirtschaftliche Vergleichsparameter RER-Linien A, B und E in Paris . 158
4.7.1 Die Strecke von Caltrain 162
4.7.2 Quotienten auf dem Ast Gilroy - San Francisco in der HVZ 163

4.7.3 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Gilroy - San Francisco in der HVZ . . . 164
4.7.4 Netzgrafikausschnitt Caltrain für nordwärts fahrende Züge in der morgendlichen HVZ . . . 165
4.7.5 Entwurf eines Bedienkonzepts der Caltrain-Züge . . . 166
4.7.6 Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei Caltrain San Francisco . . . 167
4.7.7 Verkehrliche Vergleichsparameter Caltrain San Francisco . . . 168
4.7.8 Betriebliche Vergleichsparameter Caltrain San Francisco . . . 169
4.7.9 Wirtschaftliche Vergleichsparameter Caltrain San Francisco . . . 170

5.1.1 Zusammenfassung der Reisezeitgewinne gegenüber haltenden Zügen . . 175
5.1.2 Darstellung von Aspekten zu Reisezeitgewinnen pro Fahrt . . . 175
5.1.3 Halteabstand . . . 178
5.1.4 Median der Reisezeiten . . . 180
5.1.5 Gesamtwartezeit und ihr Anteil an der Gesamtreisezeit aller Relationen 181
5.1.6 Zusammenfassung der Quotienten Platzangebot, Verkehrsangebotsleistung, Zugfahrten und Stationshalte . . . 182
5.1.7 Verkehrsangebotsleistung pro Strecke in Abhängigkeit der Entfernung vom nächsten zentralen Punkt . . . 183
5.1.8 Vergleichsparameter zur Verteilung der Abfahrtsabstände und des Platzangebotes . . . 185
5.1.9 Varianz des Platzangebotes in der HVZ in Bezug auf die Lage der Strecken im Netz . . . 187
5.1.10 Varianz des Deltas des Platzangebotes in der HVZ in Bezug auf die Lage der Strecken im Netz . . . 187
5.1.11 Stationenliste auf der Pariser RER-Linie B mit Markierung der vom nächsten Zug bedienten Stationen . . . 190
5.2.1 Anzahl Gleise pro Strecke . . . 192
5.2.2 Schema eines Nahverkehrsnetzes mit Vorortstrecken und Verbindungsbahn 192
5.2.3 Zusammenfassung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten und der Reisegeschwindigkeit . . . 194
5.2.4 Anzahl an Zugfahrten pro Richtung in der HVZ in Bezug auf die Lage der Strecken im Netz . . . 196
5.2.5 Maximale Anzahl an Zugfahrten pro Stunde und Richtung bzw. Gleis . 196
5.2.6 Quotienten der Zugfahrten der einzelnen Netze . . . 197
5.2.7 Länge der HVZ . . . 198

5.2.8 Gesamtzahl der Endstellen und Zwischenendstellen bzw. Anteil der Endstellen an allen Stationen im Verhältnis zu der Netzausdehnung 199
5.2.9 Entfernung der Endstellen und Zwischenendstellen in den Netzen von den definierten zentralen Punkten 199
5.2.10 Varianz der Fahrtlänge 201
5.2.11 Anteil der Expresszüge 202
5.2.12 Anteil Expressfahrten pro Strecke sowie Anteil ausgelassener Halte pro Fahrt 202
5.2.13 Anteil haltender Züge pro Station in Bezug auf die Lage der Stationen im Netz 203
5.2.14 Anteil haltender Züge pro Station in Bezug auf die Anzahl an Zugfahrten pro Richtung 204
5.2.15 Ausgelassene Halte in Folge 205
5.2.16 Zusammenfassung der Daten zur Zugstärke und ihrer Änderung in der HVZ 206
5.3.1 Erlöse und Längen der eingesetzten Zugformationen 208
5.3.2 Fahrtdauer in Lastrichtung sowie entgegen der Lastrichtung 209
5.3.3 Anteil haltender Züge pro Station 210
5.3.4 Quotienten der Fahrten entgegen der Lastrichtung 210
5.3.5 Fahrtlängen in Lastrichtung sowie entgegen der Lastrichtung 211
5.3.6 Fahrzeugkosten und Fahrzeugenergiekosten 212
5.3.7 Energiebedarf pro Abfahrt und Zuglängenmeter bzw. Sitzplatz 213
5.4.1 Verkehrliche Differenzierung in den sieben untersuchten Netzen 215
5.4.2 Betriebliche Differenzierung in den sieben untersuchten Netzen 216
5.4.3 Wirtschaftliche Differenzierung in den sieben untersuchten Netzen . . . 217
5.4.4 Alle Vergleichskriterien in den sieben untersuchten Netzen 217

A.1.1 Quotienten auf dem Ast Teltow Stadt - Friedrichstraße A-2
A.1.2 Quotienten auf dem Ast Blankenfelde - Friedrichstraße A-3
A.1.3 Quotienten auf dem Ast Oranienburg - Friedrichstraße A-3
A.1.4 Quotienten auf dem Ast Bernau - Friedrichstraße A-4
A.1.5 Quotienten auf dem Ast Hennigsdorf - Friedrichstraße A-4
A.1.6 Quotienten auf dem Ast Erkner - Friedrichstraße A-5
A.1.7 Quotienten auf dem Ast Strausberg Nord - Friedrichstraße A-5
A.1.8 Quotienten auf dem Ast Wartenberg - Friedrichstraße A-6
A.1.9 Quotienten auf dem Ast Spandau - Friedrichstraße A-6
A.1.10 Quotienten auf dem Ast Ahrensfelde - Friedrichstraße A-7

A.1.11 Quotienten auf dem Ast Potsdam Hbf - Friedrichstraße A-7
A.1.12 Quotienten auf dem Ast Flughafen Schönefeld - Berlin Südkreuz A-8
A.1.13 Quotienten auf dem Ast Spindlersfeld - Hermannstraße A-8
A.1.14 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Teltow Stadt - Friedrichstraße in der HVZ A-9
A.1.15 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Blankenfelde - Friedrichstraße in der HVZ A-9
A.1.16 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Oranienburg - Friedrichstraße in der HVZ A-10
A.1.17 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Bernau - Friedrichstraße in der HVZ A-10
A.1.18 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Hennigsdorf - Friedrichstraße in der HVZ A-11
A.1.19 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Erkner - Friedrichstraße in der HVZ A-11
A.1.20 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Strausberg Nord - Friedrichstraße in der HVZ A-12
A.1.21 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Wartenberg - Friedrichstraße in der HVZ A-12
A.1.22 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Spandau - Friedrichstraße in der HVZ A-13
A.1.23 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Ahrensfelde - Friedrichstraße in der HVZ A-13
A.1.24 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Potsdam Hbf - Friedrichstraße in der HVZ A-14
A.1.25 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Flughafen Schönefeld - Berlin Südkreuz in der HVZ A-14
A.1.26 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Königs Wusterhausen - Berlin Südkreuz in der HVZ A-15
A.1.27 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Spindlersfeld - Hermannstraße in der HVZ A-15
A.2.1 Quotienten auf dem Ast Minden - Hannover Hbf A-16
A.2.2 Quotienten auf dem Ast Nienburg - Hannover Hbf A-16
A.2.3 Quotienten auf dem Ast Hildesheim Hbf - Hannover Hbf A-17
A.2.4 Quotienten auf dem Ast Celle - Hannover Hbf A-17
A.2.5 Quotienten auf dem Ast Bennemühlen - Hannover Hbf A-18
A.2.6 Quotienten auf dem Ast Hannover Flughafen - Hannover Hbf A-18

A.2.7 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Minden - Hannover Hbf in der HVZ A-19
A.2.8 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Nienburg - Hannover Hbf in der HVZ A-19
A.2.9 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Hildesheim Hbf - Hannover Hbf in der HVZ A-20
A.2.10 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Celle - Hannover Hbf in der HVZ A-20
A.2.11 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Bennemühlen - Hannover Hbf in der HVZ A-21
A.2.12 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Hannover Flughafen - Hannover Hbf in der HVZ A-21
A.2.13 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Paderborn Hbf - Hannover Hbf in der HVZ A-22
A.3.1 Quotienten auf dem Ast Vantaankoski - Helsinki A-23
A.3.2 Quotienten auf dem Ast Riihimäki - Helsinki A-23
A.3.3 Quotienten auf dem Ast Lahti - Helsinki A-24
A.3.4 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Karjaa - Helsinki in der HVZ A-25
A.3.5 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Vantaankoski - Helsinki in der HVZ A-25
A.3.6 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Riihimäki - Helsinki in der HVZ A-26
A.3.7 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Lahti - Helsinki in der HVZ A-26
A.4.1 Quotienten auf dem Ast Farum - Nørreport A-27
A.4.2 Quotienten auf dem Ast Høje Taastrup - Nørreport A-27
A.4.3 Quotienten auf dem Ast Klampenborg - Nørreport A-28
A.4.4 Quotienten auf dem Ast Køge - Nørreport A-28
A.4.5 Quotienten auf dem Ast Frederikssund - Nørreport A-29
A.4.6 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Farum - Nørreport in der HVZ A-30
A.4.7 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Høje Taastrup - Nørreport in der HVZ A-30
A.4.8 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Klampenborg - Nørreport in der HVZ A-31

A.4.9 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Hillerød - Nørreport in der HVZ A-31
A.4.10 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Køge - Nørreport in der HVZ A-32
A.4.11 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Frederikssund - Nørreport in der HVZ A-32
A.5.1 Quotienten auf dem Ast Holzkirchen - München Hbf A-33
A.5.2 Quotienten auf dem Ast Flughafen München - München Marienplatz . A-33
A.5.3 Quotienten auf dem Ast Mammendorf - München Marienplatz A-34
A.5.4 Quotienten auf dem Ast Tutzing - München Marienplatz A-34
A.5.5 Quotienten auf dem Ast Herrsching - München Marienplatz A-35
A.5.6 Quotienten auf dem Ast Freising - München Marienplatz A-35
A.5.7 Quotienten auf dem Ast Petershausen - München Marienplatz A-36
A.5.8 Quotienten auf dem Ast Altomünster - München Marienplatz A-36
A.5.9 Quotienten auf dem Ast Ebersberg (Oberbay) - München Marienplatz A-37
A.5.10 Quotienten auf dem Ast Geltendorf - München Marienplatz A-37
A.5.11 Quotienten auf dem Ast Kreuzstraße - München Marienplatz A-38
A.5.12 Quotienten auf dem Ast Wolfratshausen - München Marienplatz A-38
A.5.13 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Holzkirchen - München Hbf in der HVZ A-39
A.5.14 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Flughafen München - München Marienplatz in der HVZ A-39
A.5.15 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Mammendorf - München Marienplatz in der HVZ A-40
A.5.16 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Tutzing - München Marienplatz in der HVZ A-40
A.5.17 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Herrsching - München Marienplatz in der HVZ A-41
A.5.18 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Freising - München Marienplatz in der HVZ A-41
A.5.19 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Erding - München Marienplatz in der HVZ A-42
A.5.20 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Petershausen - München Marienplatz in der HVZ A-42
A.5.21 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Altomünster - München Marienplatz in der HVZ A-43

A.5.22 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Ebersberg (Oberbay) - München Marienplatz in der HVZ A-43
A.5.23 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Geltendorf - München Marienplatz in der HVZ A-44
A.5.24 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Kreuzstraße - München Marienplatz in der HVZ A-44
A.5.25 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Wolfratshausen - München Marienplatz in der HVZ A-45
A.6.1 Quotienten auf dem Ast Saint-Rémy-lès-Chevreuse - Châtelet-les-Halles A-46
A.6.2 Quotienten auf dem Ast Robinson - Châtelet-les-Halles A-46
A.6.3 Quotienten auf dem Ast Mitry-Claye - Châtelet-les-Halles A-47
A.6.4 Quotienten auf dem Ast Boissy-St-Léger - Châtelet-les-Halles A-47
A.6.5 Quotienten auf dem Ast Marne-la-Vallée - Châtelet-les-Halles A-48
A.6.6 Quotienten auf dem Ast Cergy-le-Haut - Châtelet-les-Halles A-48
A.6.7 Quotienten auf dem Ast St-Germain-en-Laye - Châtelet-les-Halles . . . A-49
A.6.8 Quotienten auf dem Ast Poissy - Châtelet-les-Halles A-49
A.6.9 Quotienten auf dem Ast Chelles Gournay - Haussmann Saint-Lazare . A-50
A.6.10 Quotienten auf dem Ast Tournan - Haussmann Saint-Lazare A-50
A.6.11 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Saint-Rémy-lès-Chevreuse - Châtelet-les-Halles in der HVZ A-51
A.6.12 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Robinson - Châtelet-les-Halles in der HVZ A-51
A.6.13 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Aéroport Charles de Gaulle 2 TGV - Châtelet-les-Halles in der HVZ A-52
A.6.14 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Mitry-Claye - Châtelet-les-Halles in der HVZ A-52
A.6.15 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Boissy-St-Léger - Châtelet-les-Halles in der HVZ A-53
A.6.16 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Marne-la-Vallée - Châtelet-les-Halles in der HVZ A-53
A.6.17 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Cergy-le-Haut - Châtelet-les-Halles in der HVZ A-54
A.6.18 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast St-Germain-en-Laye - Châtelet-les-Halles in der HVZ A-54
A.6.19 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Poissy - Châtelet-les-Halles in der HVZ A-55

A.6.20 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Chelles Gournay - Haussmann Saint-Lazare in der HVZ A-55
A.6.21 Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Tournan - Haussmann Saint-Lazare in der HVZ A-56

B.1.1 Verwendete MySQL-Tabellen und ihr Zusammenhang A-57
B.2.1 Aufbau des PHP-Skriptes A-58

Tabellenverzeichnis

1.4.1 Spaltenformat der importierten Fahrplantabellen 7

3.2.1 Verkehrliche Vergleichskriterien für die einzelnen vorgestellten Systeme 39
3.2.2 Betriebliche Vergleichskriterien für die einzelnen vorgestellten Systeme 53
3.2.3 Unterhaltungs-/Instandhaltungskosten der Referenzfahrzeugtypen . . . 63
3.2.4 Spezifische Traktionsenergiekosten 64
3.2.5 Wirtschaftliche Vergleichskriterien für die einzelnen vorgestellten Systeme 68
3.3.1 Reisezeitgewinne im Beispielnetz Lummerland 73
3.3.2 Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für das Beispielnetz der Insel Lummerland 75

4.1.1 Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in Berlin 79
4.1.2 Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Berlin 90
4.1.3 Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Berlin 91
4.1.4 Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Berlin 92
4.2.1 Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in Hannover 93
4.2.2 Reisezeitgewinne bei der S-Bahn Hannover 98
4.2.3 Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Hannover 99
4.2.4 Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Hannover 103
4.2.5 Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Hannover 104
4.3.1 Zugstärkenänderung im Vorortverkehr Helsinki zwischen HVZ und NVZ 108

4.3.2 Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in Helsinki . . . 110
4.3.3 Reisezeitgewinne im Großraum Helsinki in der morgendlichen HVZ stadteinwärts . . . 112
4.3.4 Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien für den Nahverkehr im Großraum Helsinki . . . 116
4.3.5 Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für den Nahverkehr im Großraum Helsinki . . . 117
4.3.6 Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien für den Nahverkehr im Großraum Helsinki . . . 118
4.4.1 Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in Kopenhagen . . . 124
4.4.2 Reisezeitgewinne bei DSB S-tog Kopenhagen durch Expressfahrten . . 126
4.4.3 Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien für DSB S-tog in Kopenhagen . . . 126
4.4.4 Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für DSB S-tog in Kopenhagen . . . 130
4.4.5 Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien für DSB S-tog in Kopenhagen . . . 131
4.5.1 Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in München . . . 133
4.5.2 Reisezeitgewinne auf den einen oder mehrere Halte auslassenden Fahrten in München . . . 138
4.5.3 Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn München . . . 143
4.5.4 Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für die S-Bahn München . . . 144
4.5.5 Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn München . . . 145
4.6.1 Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in Paris . . . 151
4.6.2 Reisezeitgewinne auf den RER-Linien A,B, und E in der morgendlichen HVZ stadteinwärts . . . 154
4.6.3 Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien der RER-Linien A, B und E in Paris . . . 159
4.6.4 Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien der RER-Linien A, B und E in Paris . . . 160

4.6.5 Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien der RER-Linien A, B und E in Paris 161
4.7.1 Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in San Francisco 165
4.7.2 Reisezeitgewinne bei Caltrain in der morgendlichen HVZ nordwärts . . 166
4.7.3 Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien bei Caltrain San Francisco 171
4.7.4 Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien bei Caltrain San Francisco 172
4.7.5 Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien bei Caltrain San Francisco 173

5.1.1 Cluster zu Haltedifferenzierung und Reisezeitgewinnen 179
5.1.2 Zusammenfassung der Werte zu Umstiegen und Fahrwiderstand 181
5.1.3 Cluster zur Differenzierung der Verdichtung des Platz- und Fahrtenangebotes 184
5.1.4 Cluster zur Verteilung des Platzangebotes 188
5.2.1 Zugbeeinflussungssysteme in den betrachteten Netzen 194
5.2.2 Cluster zum Quotienten der Anzahl Zugfahrten 197
5.2.3 Cluster zu dem Anteil an Expressfahrten im Gesamtnetz 202
5.2.4 Fahrten entgegen der Lastrichtung 207
5.4.1 Abweichungen zwischen Caltrain, San Francisco, und den übrigen Netzen (Maximalwerte) 214

Abkürzungsverzeichnis

AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz der Bundesrepublik Deutschland
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
DB AG	Deutsche Bahn AG
DSB	Danske Statsbaner
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
ETCS	European Train Control System
EUR	Euro
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
GG	Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland
Hbf	Hauptbahnhof
HVZ	Hauptverkehrszeit
ICE	InterCityExpress
KWA	Kosten-Wirksamkeits-Analyse
LZB	Linienzugbeeinflussung
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NKA	Nutzen-Kosten-Analyse
NVZ	Nebenverkehrszeit
NWA	Nutzwertanalyse
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PBefG	Personenbeförderungsgesetz
PHP	PHP: Hypertext Preprocessor
Pkm	Personenkilometer
Plkm	Platzkilometer
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
RATP	Régie autonome des transports parisiens
RegG	Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs
RE	Regionalexpress

RER	Réseau Express Régional
SAHR	Sum of Arrival Headway Reciprocals
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SGV	Schienengüterverkehr
SNCF	Société nationale des chemins de fer français
SOB	Schweizerische Südostbahn AG
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
SSHR	Sum of Shortest Headway Reciprocals
UIC	Union internationale des chemins de fer / International Union of Railways
UStG	Umsatzsteuergesetz
VR	VR-Yhtymä Oy
ZBS	Zugbeeinflussungssystem S-Bahn Berlin
Zugkm	Zugkilometer

1. Einleitung

Das einleitende Kapitel bietet eine Hinführung zum Thema, indem im Verlauf die zu untersuchenden Ziele der Arbeit vorgestellt werden. Nach der Abgrenzung der Untersuchungen werden hierzu Aufbau und Methodik der Arbeit beschrieben.

1.1. Themenstellung

Der Öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) unterliegt zeitlich schwankender Nachfrage. In Zeiten erhöhter Nachfrage wird zur Befriedigung der Verkehrsbedürfnisse das Angebot ausgeweitet. Übliche Mittel dazu sind einerseits eine Verlängerung der eingesetzten Fahrzeuge, soweit dies systemtechnisch möglich ist, und andererseits eine Verdichtung des Fahrtenangebotes.

Nah- und Regionalverkehre werden in Europa von den zuständigen Aufgabenträgern bei Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) bestellt und bezahlt. In Deutschland werden dafür jährlich gut sechs Milliarden Euro sogenannter Regionalisierungsmittel eingesetzt, die möglichst gezielt entsprechend der Verkehrsnachfrage verteilt werden sollten. Dies ist insbesondere dann schwierig, wenn die Verkehrsspitzen nur einen Teilabschnitt einer Linie treffen. Besteht auf unterschiedlichen Linienabschnitten eine deutlich unterschiedliche Verkehrsnachfrage, ist eine Differenzierung des Angebotes geboten.

Zur Anpassung des Angebotes gibt es grundlegend zwei Möglichkeiten. Einerseits kann die Fahrzeugkapazität (abschnittsweise) an die Nachfrage angepasst werden: Das Stärken oder Schwächen von Zügen stellt an Unterwegsbahnhöfen ein betriebliches Hindernis dar und erfordert entsprechend geeignetes Fahrzeugmaterial.[1] Die zweite Möglichkeit ist der Einsatz zusätzlicher Züge auf stark frequentierten Abschnitten. Dazu sind einerseits entsprechende Kapazität der Infrastruktur und andererseits zusätzliche Fahrzeuge und Personale notwendig. Zudem kann hier das Problem der ungleichmäßigen Verteilung der Fahrgäste entstehen, die trotz bestehender Verstärkerangebote das Grundangebot nutzen.

[1] Ist dies nicht möglich, wird in der Regel das dem am stärksten nachgefragten Abschnitt entsprechende Platzangebot auf dem gesamten Laufweg der Linie geboten. So wird zum Teil über viele Kilometer *heiße Luft* befördert.

Eine Alternative zu diesen klassischen Verstärkungsmodellen kann der Einsatz von abschnittsweisen Expresszügen sein. Diese können gezielt zur Lenkung der Fahrgäste genutzt werden. Zudem bieten sie die Möglichkeit, auf längeren Distanzen durch Reisezeitgewinne[2] das Angebot attraktiver zu gestalten sowie das Fahrzeugmaterial spezifischer mit der Nachfrage abzugleichen. So muss nicht zwingend auf den längsten Laufwegen, die nur ein kleiner Teil der Fahrgäste in Anspruch nehmen, auch der längste Zug verkehren. Im Fokus dieser Arbeit steht diese Differenzierung des Verkehrsangebotes, die in verschiedenen Systemen analysiert und miteinander verglichen werden soll.

Die Ausgestaltung der Systeme des ÖPNV ist stets eng mit der Topologie, der Historie und den politischen Randbedingungen verknüpft. Damit sind Vergleiche über unterschiedliche Netze aufgrund der lokalen und gegebenen Unterschiede schwer und daher leicht angreifbar als Vergleiche von *Äpfeln und Birnen*. Dennoch soll hier der Versuch unternommen werden, unterschiedliche Systeme des Stadtschnellbahnverkehrs derart zu beschreiben, dass die Vergleichbarkeit gegeben ist.

Abschnittsweise Expressfahrten stellen eine Form der Hierarchisierung paralleler Verkehrsangebote darf, indem im günstigsten Fall überlappende *Kompetenzbereiche* vermieden und die Produkte klar voneinander abgegrenzt werden.

1.2. Ziele der Arbeit und Abgrenzung des Themas

Die Arbeit soll die Eigenschaften des genannten Prinzips der abschnittsweisen Expresszüge quantifizierend und qualifizierend untersuchen, so dass Parameter zur Planung und Umsetzung derartiger Angebot identifiziert werden können.

Es soll eine Methodik entwickelt werden, die Verkehrssysteme am Beispiel spurgebundener stadtschnellbahnartiger Netze mit vergleichbaren Parametern beschreibt.

Die Beschreibung erfolgt dabei aus drei Blickwinkeln:

- Differenzierte Angebote wie abschnittsweise Expressfahrten sind eine *verkehrliche* Maßnahme, die Reisezeiten verkürzen und damit die Attraktivität erhöhen kann. Eine Differenzierung kann jedoch auch die Zahl der umsteigefreien Relationen reduzieren.
- Eine differenzierte Betriebsdurchführung, beispielsweise mit abschnittsweisen Expressfahrten, stellen im Gegensatz zu homogener Betriebsführung mit ausschließlich Fahrten mit gleichartigen Halteregimen eine *betriebliche* Herausforderung dar.

[2] Es können mitunter lediglich gefühlte Reisezeitgewinne sein.

➤ Differenzierte Angebote haben *wirtschaftliche* Aspekte: einer Reduktion von Stationshalten, Personaleinsatzzeiten und Fahrzeugkosten auf der einen Seite können Kosten durch längere Laufwege und zusätzliche Verstärkerfahrten auf der anderen Seite gegenüber stehen.

Trotz etwas abgeflachter Tagesganglinien durch flexiblere Arbeitszeiten als noch vor 30 Jahren[3] gibt es in Ballungsräumen weiterhin stark ausgeprägte Spitzenzeiten, im weiteren Verlauf als Hauptverkehrszeit (HVZ) bezeichnet. In diesen Zeiten werden Systeme des ÖPNV am stärksten gefordert. Aus diesem Grund erfolgen die Betrachtungen nur für diesen Zeitraum größter Belastung. Die übrigen Verkehrszeiten, zusammengefasst fortan als Nebenverkehrszeit (NVZ) bezeichnet,[4] dienen an einigen Stellen als Vergleichsbasis.

Die zuvor genannten Punkte lassen sich in der folgenden Forschungsfragestellung zusammenfassen:

➤ Auf welche Weise ließe sich der Aufwand und Nutzen beschleunigter Angebote des Linienverkehrs beurteilen und wie lässt sich insbesondere zu Spitzenzeiten die Kapazität aus verkehrlicher, betrieblicher und wirtschaftlicher Sicht steigern? Inwieweit ähneln sich unterschiedliche Netze mit abschnittsweisen Expressfahrten in ihren Eigenschaften?

Oeftering (1964, S. 517) stellte fest, dass *„. . . jedes Verkehrsmittel seine artgemäßen Vorteile zur Geltung bringen sollte.“* Auch Grassmann (1964a, S. 123) zitiert von der Weltausstellung 1964 eine ähnliche Formulierung: *„Jedes Verkehrsmittel dort einsetzen, wo es seinem Wesen nach die besten Dienste leistet! Harmonische Zusammenarbeit führt zum Ziel.“* Beide Beiträge bezogen sich dabei vor allem auf die Abgrenzung des ÖPNV zu dem in den 1950er Jahren wachsenden Straßenverkehr. Die Aussagen lassen sich jedoch auch auf die einzelnen Angebote innerhalb des Eisenbahnsystems übertragen, die bei abschnittsweisen Expressfahrten innerhalb des Systems in gewissem Maß eine Hierarchie haben.

Wenngleich die Forschungsfrage auf hierarchisierte Verkehrsangebote vom Bus bis zum Hochgeschwindigkeitsverkehr anwendbar ist, liegt der Fokus der Untersuchungen auf den spurgeführten Systemen und dort im Bereich der (in Deutschland nach der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) verkehrenden) Eisenbahnen im Schnellverkehr von Ballungsräumen. Die erarbeitete Methodik kann jedoch auf jegliche mehrstufigen (öffentlichen) Verkehrssysteme übertragbar sein. Dies schließt auch nicht-spurgeführte Systeme im kommunalen ÖPNV ein, wenngleich die Ausdehnung dieser Netze in der Regel geringer ist. Da dort allerdings

[3] Vgl. Weidmann (1994, S. 137) und Reinhardt (2012, S. 450) zu Beispielen von typischen Tagesganglinien sowie Boltze u. Kittler (2011) zu Maßnahmen zur zeitlichen Steuerung der Nachfrage.

[4] Die Einteilung folgt der in Berlin üblichen Unterteilung in Haupt-, Neben- und Schwachverkehrszeit, wie sie beispielsweise in o.A. (2010a, Anlage 1.6) zu finden ist.

die Randbedingungen im Betrieb (Spurführung, Fahrzeugfolgeregelung, ...) schwächer sind als im spurgeführten Verkehr, genügt zur Entwicklung der Methodik eine Betrachtung der Eisenbahnen bzw. eisenbahnähnlichen Stadtschnellbahnsysteme. Entsprechend wird auch der Personenfernverkehr in den Betrachtungen ausgegrenzt. Auf diesen sollten sich die Ergebnisse jedoch auch angepasst übertragen lassen. Durch größere Distanzen, längere Reisezeiten und geringere Takte sind die Dimensionen jedoch ebenfalls andere als im Stadtschnellbahnverkehr.

1.3. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit teilt sich neben dem einleitenden und dem abschließenden Abschnitt in drei große Abschnitte.[5]

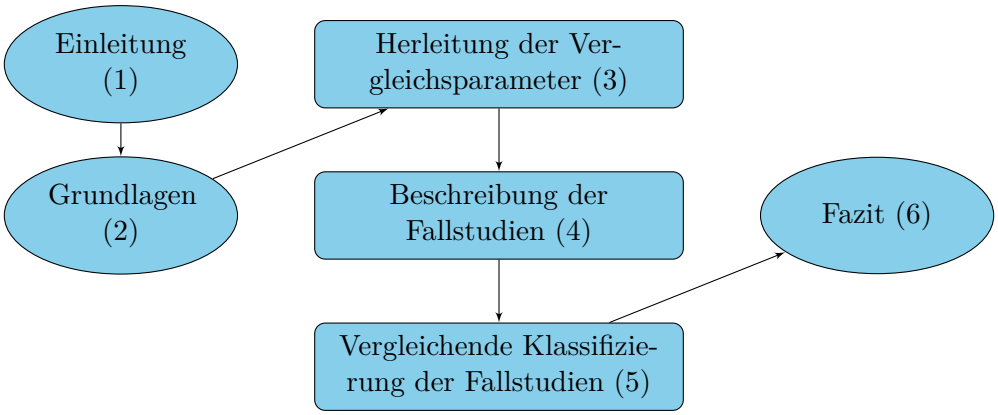

Abbildung 1.3.1: Aufbau der Arbeit (Zahlen in Klammern bezeichnen das jeweilige Kapitel).

Nach dem einleitenden Kapitel mit Vorstellung der Forschungsfrage und Abgrenzung zu vorhergehenden Untersuchungen erfolgt im Anschluss in Kapitel 2 eine Beschreibung der Grundlagen des Eisenbahnsystems und der Verkehrsplanung. Diese weitgehend auf Literaturrecherche basierende Darstellung ist zur Festlegung von Begrifflichkeiten und vorhandener Rahmenbedingungen des Systems eine Basis der darauf folgenden Kapitel.

In dem daran anschließenden Kapitel 3 werden Parameter entwickelt, die zur Beschreibung der anschließend betrachteten Systeme herangezogen werden mit dem Ziel, eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Diese Parameter decken die im Abschnitt 1.2 bei den Zielen genannten verkehrlichen, betrieblichen und wirtschaftlichen Blickwinkel ab. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der erarbeiteten Beschreibungsparameter sowie einer Einführung und Erläuterung der verwendeten Darstellungstechniken (Diagramme, Tabellen, Karten).

[5] Vgl. Abbildung 1.3.1.

Anschließend erfolgt in Kapitel 4 eine Analyse der ausgewählten Systeme als Fallstudien hinsichtlich der in Abschnitt 1.2 genannten Punkte und in Kapitel 3 erarbeiteten Beschreibungsparameter. Die Analyse soll die als Ziel definierten Kriterien mit realen Werten unterlegen. Den eigentlichen Vergleich der Fallbeispiele stellt die Klassifizierung in Kapitel 5 dar. Hier wird die Beschreibungsmethodik auf Basis der betrachteten Schnellbahnsysteme evaluiert. Dabei liegt ein Augenmerk auch auf der Prüfung, inwieweit die verwendete Methodik für die Beschreibung einzelner Korridore anwendbar ist.

Kapitel 6 fasst die Erkenntnisse abschließend zusammen und gibt Ansätze für weitergehende Untersuchungen.

1.4. Methodisches Vorgehen

Die Darstellung der Grundlagen basiert auf einer großflächigen Literaturrecherche und dem im Rahmen der Lehrtätigkeit des Autors am Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der Technischen Universität Berlin erworbenen Wissen.

Ausgehend von der Forschungsfrage und basierend auf eigenen Betrachtungen, vorhergehenden Arbeiten und Veröffentlichungen werden die Beschreibungskriterien erarbeitet. Diese haben das Ziel, die Unterschiede der einzelnen anschließend betrachteten Verkehrssysteme möglichst umfassend zu beschreiben. Entsprechend handelt es sich um einen in der Erarbeitung iterativen Prozess, bei dem einzelne Beschreibungskriterien ergänzt werden, nachdem in der Analyse eines Systems deutlich geworden ist, dass es sich in einem bestimmten Aspekt von anderen Systemen unterscheidet. Dem folgend sind die Beschreibungskriterien so gewählt, dass in jedem Aspekt mindestens eines der betrachteten Systeme eine andere Ausprägung hat als die Übrigen.

Einfluss in die Definition einiger Beschreibungskriterien fanden vorangegangene wissenschaftliche Arbeiten. Zu nennen sind hier insbesondere die Dissertationen von Walf (2008), Bunge (2011) und Bertard (2013) sowie die Diplomarbeit des Autors (Blome (2007)). Bei der Auswertung der Reiseverbindungen wurde der von Friedrich (2017) entwickelte Verbindungssuchalgorithmus in angepasster Form eingesetzt. Einige zugrunde liegende Recherchen und Auswertungen sind im Rahmen vom Autor betreuter Studien- und Abschlussarbeiten am Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der Technischen Universität Berlin entstanden. Die jeweiligen Autoren werden an den entsprechenden Stellen zitiert. Besonders hervorzuheben sind die Arbeiten von Linderoos (2009, 2012), Dilba u. Künzel (2011) und Heinrich (2014).

Die verwendeten Daten der vorgestellten Verkehrssysteme stammen aus Veröffentlichungen der Betreiber in Fachzeitschriften, Publikationen wie Netz- und Fahrplänen sowie wissenschaftlichen Beiträgen und Arbeiten.[6] Weitere Quellen sind vorangegangene Studien sowie eigene Beobachtungen des Autors in den betrachteten Netzen.[7] Die Liniennetzpläne sind eigene Darstellungen auf Basis der Pläne der jeweiligen Betreiber.

Diese Arbeit schließt sich an Gedanken von Grassmann (1969) und Heinrich (1970) am damaligen Institut für Eisenbahnwesen[8] an und fügt sich ein in die Reihe der Dissertationen der beiden vorhergehenden wissenschaftlichen Mitarbeiter mit Lehraufgaben am Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb. Während Walf (2008) den Ansatz einer Änderung des Grundtaktes als Ziel seiner Arbeit hatte, behandelte Grosse (2003) einige Jahre zuvor die verkehrsabhängige Betriebsführung bei Stadtschnellbahnen und in diesem Zusammenhang entsprechend auch die Verdichtung des Angebotes mit verschiedenen Ansätzen.

Zur Darstellung von ausgewählten Daten in Bildfahrplänen und Netzgrafiken wird die Software Viriato der Firma SMA+Partner (Zürich) eingesetzt, die mit einer akademischen Lizenz am Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb zur Erarbeitung genutzt werden konnte.

In der Beschreibung werden Methoden der Nutzwertanalyse eingesetzt. Die Herleitung der Beschreibung ist in den Abschnitten 3.1 und 3.2 beschrieben. Die verwendete Skala beruht auf den Werten sämtlicher betrachteten Netze.

Um die Vielfalt der verschiedenen Quelldatenformate beherrschen und in der Erarbeitung Veränderungen schnell in Diagrammen visualisieren und einheitlichen Tabellen ausgeben zu können, wurden alle Daten zur Beschreibung der Systeme in Kapitel 196 in einer MySQL-Datenbank erfasst. Den größten Teil der Eingangsdaten nehmen Fahrplandaten ein, die in Form von Tabellen mit dem simplen Aufbau aus Tabelle 1.4.1 importiert werden.

Sämtliche Datenauswertungen erfolgten mit Hilfe selbst geschriebenen Codes in der Skriptsprache PHP.

Abbildung 1.4.1 zeigt den Fluss der Daten im Verlauf der Auswertung. Die Abbildung illustriert damit den Erarbeitungsprozess, der für jedes Fallbeispiel in Abschnitt 4 mit der Erfassung der

[6] Zu nennen sind hier für Kopenhagen vor allem die Paper sowie die Dissertation von Thorlacius (2017).

[7] Zu nennen ist hier insbesondere das Praktikum des Autors bei der Régie autonome des transports parisiens (RATP) in Paris im Jahr 2006.

[8] Dies ist das Vorläuferinstitut des heutigen Fachgebietes Schienenfahrwege und Bahnbetrieb im Institut für Land- und Seeverkehr der Technischen Universität Berlin.

Tabelle 1.4.1: Spaltenformat der importierten Fahrplantabellen.

Bezeichnung	Beschreibung
Station	Name
Zeit	Stunde:Minuten[:Sekunden]
Formation	ID der Zugformation
Richtung/Zeitraum	hvz|nvz|gegen
Art	kommerziell oder leer

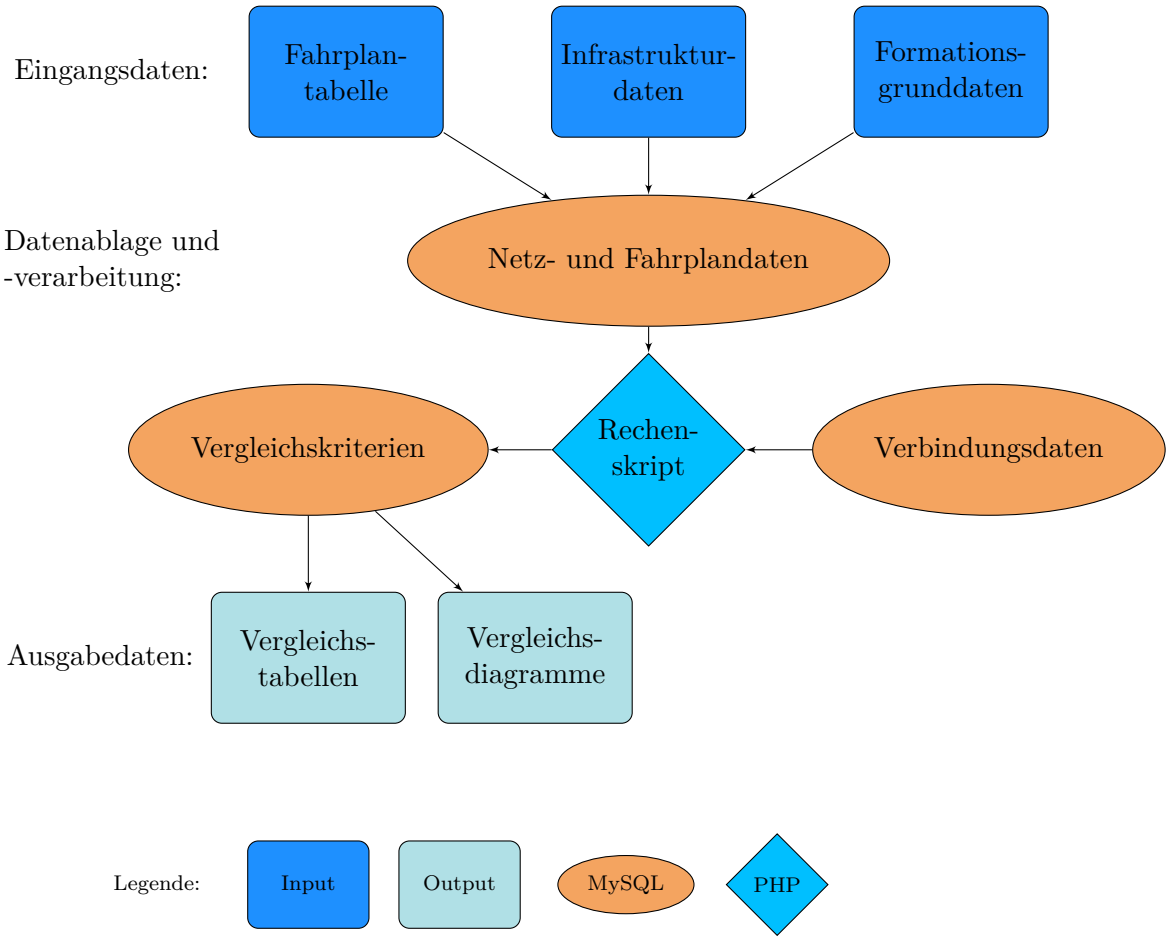

Abbildung 1.4.1: Datenfluss der Auswertung.

in der oberen Zeile genannten Quelldaten (Fahrplantabelle, Infrastrukturdaten und Formationsgrunddaten)[9] beginnt. Derart aufgebaut ist es möglich, mit geringem Aufwand bei vorliegenden tabellarischen Fahrplänen die Beschreibung eines Netzes skriptbasiert zu erzeugen. Die für alle Fallbeispiele in den MySQL-Datenbanktabellen zu Netz und Fahrplan abgelegten Daten wurden für alle Fallbeispiele in einem Schritt ausgewertet. Alle verwandten Rechenoperationen zur Ermittlung der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Parameter sind an den jeweiligen Stellen beschrieben. Eine ausführlichere Beschreibung des PHP-Code sowie die Struktur der MySQL-Tabellen sind im Anhang B zu finden.

Mit Hilfe der LaTeX-Pakete pgfplots[10] und PGF/TikZ[11] werden die insbesondere in den Kapiteln 4 und 5 dargestellten Diagramme generiert.

[9] Die Fahrplandaten müssen dabei wie oben dargestellt abschnittsweise die Verkehrszeiten und eingesetzten Formationen enthalten. Ferner sind Streckenlängen und Geschwindigkeiten erforderlich. Einzelne nicht in Fahrplänen enthaltene Daten müssen zentral für ein neues Netz erfasst werden. Die Angaben zu den Formationen enthalten die für den Vergleich notwendige Länge sowie das Sitzplatzangebot und die Gesamtmasse.

[10] Siehe https://www.ctan.org/pkg/pgfplots, letzter Zugriff am 15. Mai 2017.

[11] Siehe https://www.ctan.org/tex-archive/graphics/pgf/, letzter Zugriff am 15. Mai 2017.

2. Grundlagen und Rahmenbedingungen

Das folgende Kapitel beschreibt grundlegende Rahmenbedingungen der nachfolgenden Analysen. Nach der Definition von Begriffen wird der die Thematik betreffende Stand der Wissenschaft erläutert.[12]

2.1. Politische und organisatorische Rahmenbedingungen

Für die Gestaltung eines Verkehrssystems sind die politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen von großer Bedeutung, da diese Netze eine wichtige Rolle im öffentlichen Leben haben.[13] Die Arbeit behandelt mehrere nationale und internationale Fallbeispiele. Exemplarisch werden die Rahmenbedingungen in Deutschland beschrieben, die aufgrund der gleichen europäischen Basis jedoch auf das Ausland weitgehend übertragbar sind.[14]

Das zum 1. Januar 1996 in Kraft getretene *Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs (RegG)* legt die Organisation des Schienenpersonennahverkehr (SPNV) in die Verantwortung der Bundesländer, während die Verantwortung für den Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) weiterhin Aufgabe des Bundes ist.[15] Zur Abgrenzung zwischen Regional- und Fernverkehr definiert das Personenbeförderungsgesetz (PBefG) zwei Grenzen des Regionalverkehrs: Die gesamte Reisekette darf 50 Kilometer Reiseweite oder eine Stunde Reisezeit nicht überschreiten.[16] Heinze (2004, 2006) stellt fest, dass das Berufspendlern täglich für den Weg zwischen Wohn- und Arbeitsort zur Verfügung stehende Reisezeitbudget über Jahrzehnte

[12] Zur Vermeidung von sonst entstehenden Doppelungen gibt es in der Erarbeitung der einzelnen Beschreibungsparameter in Abschnitt 3.2 weitere Darstellungen des Standes der Wissenschaft, die in diesem Kapitel daher explizit nicht behandelt werden.

[13] Zabel (1957, S. 135) schrieb im Rahmen seiner Arbeit über Tarifverträge und europäische Integration, dass sich *„ein Streik der Bahnbediensteten, wenn er lange genug dauert, verheerend auf die ganze Wirtschaft auswirken [und] Millionen von Arbeitnehmern aus ihren Stellungen [bringen würde]“*.

[14] Die Rahmenbedingungen im ebenfalls als Fallbeispiel gewählten Korridor in San Francisco sind anders, mindern jedoch nicht die Aussagekraft der Beschreibung.

[15] Vgl. Art. 87e Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland (GG).

[16] Vgl. §8, Abs. 1 PBefG. Dies ist laut §2 RegG dann der Fall, *„wenn in der Mehrzahl der Beförderungsfälle eines Verkehrsmittels die gesamte Reiseweite 50 Kilometer oder die gesamte Reisezeit eine Stunde nicht übersteigt“*. Siehe auch Juhnke (1966a, S. 19f., S. 23f.) und Bölke u. a. (2003, S. 7). Auch das deutsche Umsatzsteuergesetz (UStG) nennt die 50-Kilometer-Grenze. Vgl. §12, Abs. 2 Nr. 10 UStG.

gleich geblieben ist. Durch verbesserte Verkehrssysteme habe sich jedoch der in diesem Rahmen erreichbare Raum deutlich vergrößert.[17]

Entsprechend ist die scharfe gesetzliche (und politische) Abgrenzung zwischen Nah- und Fernverkehr über die Reisezeit heutzutage kritisch zu hinterfragen, da es eine Reihe von Relationen gibt, auf denen Fernverkehrszüge die Grenze von einer Stunde unterschreiten und so für Berufs(fern)pendler attraktive Verbindungen bieten.[18] Durch Beschleunigung kann somit der für Pendler attraktive Raum erweitert werden, da bei gleichem Reisezeitbudget größere Distanzen überwunden werden können.[19]

Seit der Regionalisierung werden zur Durchführung der bestellten Regionalverkehre Verkehrsverträge zwischen den Ländern als Aufgabenträgern und den EVU als Erbringer der Verkehrsleistung geschlossen. Dabei kommen sowohl Brutto- als auch Nettoverträge zur Anwendung, die sich durch die Verantwortung für das Erlösrisiko unterscheiden.[20] Für die vom EVU nicht zu beeinflussenden Kostenblöcke für die Infrastrukturnutzung,[21] die während der Laufzeit nicht kalkulierbaren Kostenänderungen unterliegen können, gibt es in den Verkehrsverträgen in der Regel Durchreicheklauseln. (Höhnscheid u. Müller-Hellmann 2007, S. 29) Die Spannbreite der über Verkehrsverträge gewährten Zuschüsse variiert sehr stark in Abhängigkeit der Auslastungen und Regionen. Im Land Niedersachsen bewegen sich diese beispielsweise zwischen zwei und 14 EUR pro Zugkilometer, wobei ein *„Zuschusssatz in Höhe von [rund] 6,50 EUR/Zugkm (bei Kosten in Höhe von [rund] 10 EUR/Zugkm und Erlösen von [rund] 3,50 EUR/Zugkm) . . . [für] eher kleinere Züge mit rund 150 bis 250 Sitzplätzen“* genannt wird. Andererseits seien bei Zügen auf stärker nachgefragten Linien höhere Zuschüsse erforderlich, da allein die Kosten für die besser ausgebaute Infrastruktur mit 5 bis 6 EUR/Zugkm *„sowie sämtliche fahrzeugbezogenen Kostenkomponenten“* höher seien.

[17] Vgl. auch Heinze (1979, S. 10f.) sowie die Darstellung des innerhalb von 30 Minuten erreichbaren Halbmessers sowie des mittleren Halbmessers des Stadtgebietes aus Lehner (1955) bei Weidmann (2013a, S. 20). Heinrich (1970, S. 71) schreibt im gleichen Kontext: *„Die Reichweite des Einflusses der Kernstädte auf den Pendlerverkehr wird hauptsächlich durch die Reisezeit begrenzt. Mehr als etwa 45 Minuten Reisezeit wollen Berufstätige nicht auf sich nehmen.“*

[18] Vgl. auch Leister (2004, S. 389). Ein Beispiel ist die Schnellfahrstrecke Köln-Rhein/Main mit ihren Zwischenbahnhöfen Siegburg/Bonn, Montabaur und Limburg. (Demuth 2004; Schönberger 2004) Ein Gegenbeispiel ist eine Fahrt mit Nahverkehrsmitteln (Straßenbahn, S-Bahn und Bus) von Woltersdorf im östlichen Berliner Speckgürtel nach Berlin-Charlottenburg, die etwa 90 Minuten dauert.

[19] Vgl. u. a. Weidmann (2013a, S. 22ff.). Dies deckt sich mit der etwas älteren Aussage von Heinze (2004, Kap. 1.1, S. 4), dass im Personenverkehr *„sowohl die Zahl aller Ortsveränderungen als auch der tägliche Zeitaufwand für Verkehrszwecke aller Art relativ stabil geblieben ist.“*

[20] Bei Bruttoverträgen fließen alle Fahrgeldeinnahmen an den Aufgabenträger, der bei negativer Fahrgastentwicklung weniger Einnahmen bekommt. Bei Nettoverträgen hat das Verkehrsunternehmen das Erlösrisiko, so dass im Wettbewerbsverfahren Annahmen zur zukünftigen Fahrgastentwicklung zu treffen sind und ferner das EVU während der Vertragslaufzeit einen Anreiz hat, mehr Fahrgäste zu gewinnen, um die Einnahmen zu steigern. (Pulkkinen u. Stammler 2008, S. 8) (Höhnscheid u. Müller-Hellmann 2007, Tafel 1)

[21] Dies sind das Trassenentgelt, die Stationsentgelte und mitunter auch der Energiebezug.

(Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen mbH 2010, S. 49, S. 63) Ferner werde ein vermehrter Einsatz von Servicekräften angenommen, der ebenfalls die Kosten je Zugkilometer erhöhe. Bosserhoff (2005, Abb. 5) zeigt am Beispiel des Landes Baden-Württemberg den Zusammenhang zwischen den durchschnittlichen Fahrgastzahlen einer Strecke und dem Zuschussbedarf, der bei sehr hohen Fahrgastzahlen sehr gering ausfällt und bei schwacher Nachfrage das Zehnfache betragen kann.

2.2. Verkehrsplanung

Der Planungsprozess für Eisenbahnverkehrsleistungen hat sich aus den zuvor im Abschnitt 2.1 dargestellten nationalen und europäischen politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen entwickelt und unterliegt fortlaufenden Veränderungen. In diesem Abschnitt wird zunächst der heutige Planungsprozess in Deutschland beschrieben, der maßgebliche Auswirkungen auf die Gestaltung der Verkehrsnetze hat. Mit Blick auf die Themenstellung wird daran anschließend auf Anlässe und Methoden Planung zur Verbesserung von Verkehrsleistungen eingegangen.

2.2.1. Der Planungsprozess von Verkehrsleistungen

Die nachfolgende Beschreibung des Planungsprozesses, basierend auf Abbildung 2.2.1, versucht, den prinzipiellen Ablauf anhand einer Momentaufnahme des Prozesses in Deutschland zu erläutern, erhebt jedoch keinen Anspruch auf eine vollständige Darstellung des Prozessablaufs. In anderen (europäischen) Ländern ist der Ablauf prinzipiell ähnlich, wenngleich die unternehmerischen und organisatorischen Strukturen teilweise anders sind. Der rot hervorgehobene Bereich in der Abbildung hebt den Teil des Prozesses hervor, in dessen Bereich die Betrachtungen im weiteren Verlauf der Arbeit von Bedeutung sind.

Das Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) stellt die sichere Betriebsführung auf seinem Netz sicher, koordiniert und disponiert die Betriebsdurchführung unter Berücksichtigung der Interessen der auf dem Netz verkehrenden EVU.

Die Planung des Verkehrsangebotes liegt in der Verantwortung der EVU, die den Betrieb auf dem Netz durchführen. (Trost 2006) Ihre Angebotsplanung basiert auf den Einflüssen des Verkehrsmarktes, aus dem sich die zu erwartende Nachfrage sowie die Zahlungsbereitschaft der Kunden ergibt. Bei gemeinwirtschaftlichen Verkehren gibt es als zweite Einflussgröße die

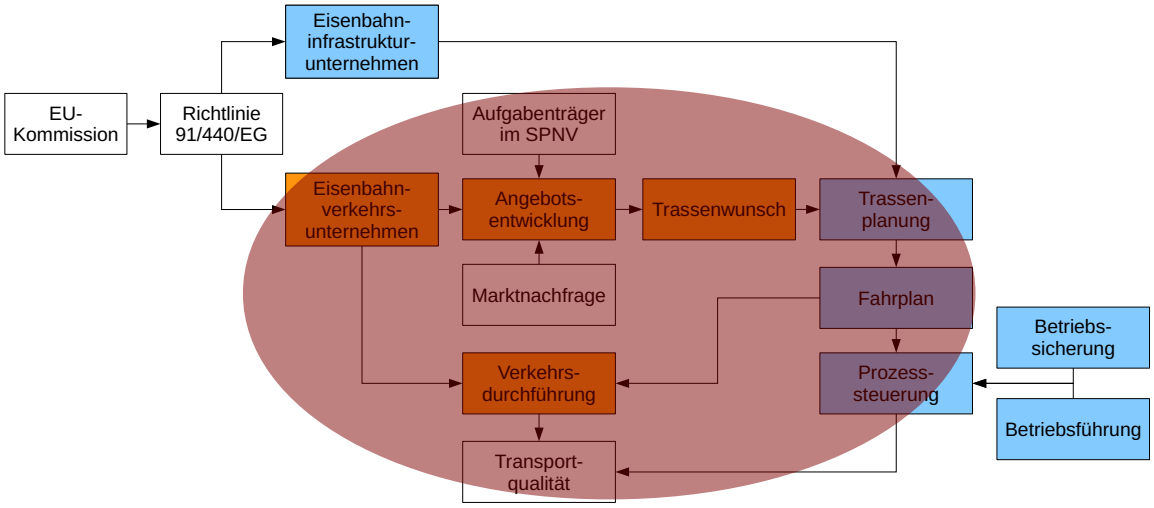

Abbildung 2.2.1: Grundstruktur des Netzmanagements [eigene Darstellung nach Schnieder (2007, S. 378)].

Aufgabenträger, die die Verkehrskonzepte erarbeiten, Verkehre ausschreiben und Verkehrsverträge im Wettbewerb vergeben.[22] Je nach Gestaltung des Wettbewerbsverfahrens gibt es mehr oder weniger Freiheitsgrade für das EVU bei der Angebotsplanung. Zur Schaffung schlüssiger Linien- und Betriebskonzepte gibt es in den meisten Regionen in Deutschland mittlerweile von den Aufgabenträgern erarbeitete ausgereifte Taktfahrplankonzepte, die die Linien der einzelnen EVU koordinieren und feste Umsteigebeziehungen definieren. (Rey 2007, S. 19) Hierarchien zwischen unterschiedlichen Linien können dabei auch EVU-übergreifend entstehen, wenn sich überlagernde Linien im Wettbewerb an unterschiedliche Unternehmen vergeben werden.[23] Entsprechend eng sind die Grenzen, in denen sich die Angebotsplanung der EVU bewegen kann. Als Ergebnis der Angebotsplanung bei dem EVU resultiert ein an das EIU gerichteter Trassenwunsch, der eine konkrete Fahrlage für einen spezifischen Zug beinhaltet.

Das EIU konstruiert auf Basis der vom EVU bereit gestellten Daten zum Fahrzeug und der gewünschten Zeitlage[24] sowie unter Berücksichtigung der Randbedingungen der Infrastruktur

[22] Vgl. auch Abschnitt 19 auf Seite 10.

[23] Ein aktuelles Beispiel in Berlin-Brandenburg sind die Regionalexpress (RE)-Linie 2 und die parallel verkehrenden Regionalbahnen 10 und 14. Während der RE2 von der Ostdeutschen Eisenbahngesellschaft betrieben wird, betreibt die DB Regio AG die überall haltenden Regionalbahnen.

[24] Nach Beck (2013) wird die DB Netz AG in den kommenden Jahren schrittweise den Prozess verändern und anstelle der Konstruktion auf Basis der Daten der EVU überwiegend mit vorab konstruierten standardisierten Trassen arbeiten, die bei einer Anfrage von EVU diesen zur Nutzung angeboten werden. (Beck 2013) Die Trassenkonstruktion erfolgt nicht wie in der Vergangenheit grundsätzlich auf Basis einer spezifischen Bestellung für eine konkrete Zugformation, sondern im Voraus auf Basis von Musterzügen. (Grossen u. Isenmann 2007, S. 5f.) Damit folgt die DB AG der Praxis aus der Schweiz und Frankreich,

eine Trasse. (Weber 2004, S. 341) Sofern das EVU mit dem Ergebnis der Trassenkonstruktion einverstanden ist, wird der Vertrag über die Trassennutzung abgeschlossen und die Trasse findet Einzug in den Fahrplan. (Müller u. a. 2004)

Neben den jährlich zum Netzfahrplan bzw. unterjährig im Gelegenheitsverkehr[25] von den EVU angemeldeten Trassen gibt es bei der DB Netz AG auch sogenannte *Rahmenverträge*. Diese laufen über mehrere Jahresfahrplanperioden und sichern dem EVU zu, vom EIU in einem definierten Rahmen[26] während der Vertragslaufzeit dieselbe Trasse zugewiesen zu bekommen. So können die EVU Investitionen in Fahrzeuge, die den größten Teil des unternehmerischen Risikos ausmachen, absichern.[27] Das EIU bekommt vor allem auf Strecken mit einer geringen Wirtschaftlichkeit eine Planungsgrundlage für Investitionen in die Schieneninfrastruktur. Für beide Vertragspartner ergeben sich durch die über einen längeren Zeitraum laufende Zuweisung der Fahrwegkapazität Vorteile aus den Rahmenverträgen. Dennoch steht die aktuelle Gestaltung von Rahmenfahrplänen durch die DB Netz AG in Deutschland seit Jahren in der Kritik (Lange 2010), da sie die EVU nicht vor *„tarifären und nichttarifären . . . [Veränderungen der] . . . Nutzungsbedingungen der Infrastruktur während einer Rahmenvertragsperiode“* schützen. (Werner 2009, S. 66ff.) Ein Beispiel hierfür können während der Vertragslaufzeit angesetzte Baustellen mit veränderten Fahrzeiten sein, bei denen dem EVU keine Ausgleichszahlungen zustehen, was sich auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung auswirkt.[28]

2.2.2. Anlässe und Methoden zur Anpassung der Planung von Verkehrsleistungen

Heinze u. Kill (1988) stellten das in Abbildung 2.2.2 vereinfacht dargestellte *Grundmuster der Verkehrsevolution* auf: Durch die Änderung von Rahmenbedingungen stößt ein bestehendes System an seine Systemgrenzen - in der Vergangenheit oftmals in Form der Kapazitätgrenze, heutzutage durchaus auch durch die Grenze der Wirtschaftlichkeit. Durch Variation wird das bestehende System verbessert - beispielsweise mit der Einführung neuer Angebotskonzepte - und die neuen Lösungen schaffen sich ihre eigene (neue) Nachfrage. Bei Heinze u. Kill geht es vor allem um gänzlich neue Verkehrssysteme sowie um aus bestehenden Systemen sich entwickelnde neue Systeme. Das Muster ist jedoch auch auf neuartige Konzepte innerhalb bestehender Systeme anwendbar.

wo mit sogenannten Trassenkatalogen gearbeitet wird. (Stohler u. Stähli 2012) Zu Auswirkungen von Trassenkatalogen auf den Wettbewerb vgl. u. a. Cosandey u. Kohler (2012).

[25] Darunter versteht die DB Netz AG alle Trassenanmeldungen, die nicht zum Anmeldeschluss des jährlichen Netzfahrplans erfolgen. (Butzbach 2010, S. 2)

[26] Das EIU hat die Möglichkeit, im Netzfahrplan die im Rahmenvertrag laufende Trasse des EVU in einem Zeitfenster von plus/minus drei Minuten (Personenverkehr) bzw. 15 Minuten (übrige Trassen) zu verschieben. (Butzbach 2010, S. 4)

[27] Vgl. Kapitel 3.2.3 und o.A. (2009, S. 5ff.).

[28] Zu den Erlösen und Kosten siehe Abschnitt 3.2.3 auf Seite 53.

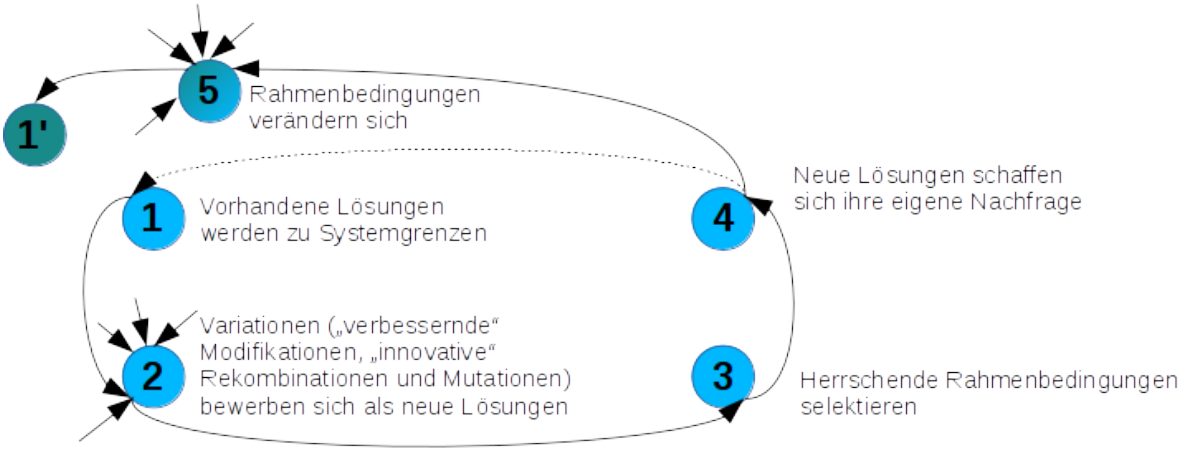

Abbildung 2.2.2: Grundmuster der Verkehrsevolution [eigene Darstellung nach Heinze (2004, Kap. 3.3, S. 68)].

Die Planung von Verkehrssystemen - im Rahmen dieser Arbeit primär auf die schienengebundenen Systeme begrenzt - wird vor allem durch zwei Aspekte getrieben: Einerseits durch das Vorhandensein einer noch unbefriedigten Nachfrage nach einem Raumüberwindungsangebot und andererseits durch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Während die Kosten bzw. die Wirtschaftlichkeit des Öffentlichen Verkehrs (ÖV) über viele Jahre gegenüber der Gewährleistung der Daseinsvorsorge im Hintergrund standen, bilden sie heute den Mittelpunkt und dominieren die Diskussion.[29] Da Nah- und Regionalverkehre in der Regel nicht ohne öffentliche Zuschüsse - in der Regel als Bestellerentgelte bezeichnet - zu betreiben sind, haben EVU und - mit dem Ziel eines möglichst effizienten Mitteleinsatzes - auch der Aufgabenträger das Ziel, den Verkehr möglichst wirtschaftlich durchzuführen. Im eigenwirtschaftlichen Fernverkehr ist dieses Ziel immanent. Dabei besteht die Herausforderung, die eingesetzten Ressourcen - insbesondere die Fahrzeuge - möglichst gut auszulasten. Weidmann (2013a, S. 49) beschreibt die Kostenfunktion des ÖV als quasi-konstant bis zu der Stelle, an der die Kapazitätsgrenze überschritten wird und die Gefäßgröße verändert werden muss.

Da die Nachfrage tageszeitlich und tagesabhängig variiert, passen sich die EVU diesen Schwankungen mit mehr oder weniger veränderten Angeboten an. Diese Anpassung war bereits Gegenstand verschiedener Studien, beispielsweise bei Krönes (1990) und Kittler (2010). Die übliche Reaktion auf diese Nachfrageschwankung sind an der Nachfrage orientierte Verkehrsangebote, die ebenfalls Gegenstand zahlreicher Untersuchungen waren. Albrecht u. a. (2003) und Albrecht u. Scholz (2006) behandeln die Optimierung von S-Bahn-Systemen. Die Dis-

[29] Ein Beispiel ist das enorme Defizit der Deutschen Bundesbahn im Jahr 1993 kurz vor der Bahnreform, diskutiert u. a. bei Ilgmann (2003, S. 8) und Julitz (1998, S. 31ff.). Zu erwähnen seien hier z. B. die heutzutage geführten Diskussionen über die Höhe und Verteilung der Regionalisierungsmittel. Vgl. Abschnitt 2.1 auf Seite 9.

sertation von Walf betrachtet die Änderung des Grundtaktes von S-Bahn-Systemen am Beispiel Berlin. Er geht darin unter anderem auf verschiedene Außenäste des S-Bahn-Netzes sowie die Abgrenzung bzw. integrierte Betrachtung der Berliner Gleichstrom-S-Bahn und der parallelen Verkehrsangebote auf den mit Wechselstrom elektrifizierten Gleisen ein. (Walf 2008, S. 171ff.) Der Gedanke einer Hierarchisierung und der abschnittsweisen Expressführung von Fahrten im Berliner S-Bahn-Netz taucht ebenso bei ihm auf (Walf 2008, S. 115f.), zum Teil angelehnt an die Erkenntnisse aus Blome (2007).

Verschiedene Methoden zur Anpassung des Angebotes zwischen HVZ und weniger stark nachgefragten Zeiten werden in Abschnitt 196 vorgestellt. Eine dieser Möglichkeiten sind abschnittsweise Expressfahrten, die zu einer Überlagerung - und damit einer Hierarchie - von Verkehren führen, sei es innerhalb des gleichen Verkehrsproduktes (z. B. S-Bahn Zürich) oder zwischen zwei Produkten (z. B. S-Bahn und paralleler Regionalverkehr in Berlin). Der Begriff der Hierarchisierung wird schon bei Kuckuck (1968, S. 49) genannt, der die Planungen für das S-Bahn-Netz im Ruhrgebiet vorgestellt hat. Die Abgrenzung der Verkehrsangebote im Nahschnellverkehr thematisierte zur gleichen Zeit auch Grassmann (1969, S. 14,23,31,35). Noch etwas älter sind die Gedanken von Oeftering (1964, S. 517) zur Hierarchie im Verkehrssektor, die bereits in der Einleitung aufgeführt wurden.[30]

[30] Vgl. Ausführungen in Abschnitt 4 auf Seite 3.

3. Beschreibung und Vergleich von Verdichtungsprinzipien in Schnellbahnnetzen

Den Kern dieser Arbeit bildet die Beschreibung von Stadtschnellbahnsystemen, welche in diesem Kapitel erarbeitet wird. Prinzipiell bedienen sich alle Konzepte einer oder beider nachfolgend genannter Möglichkeiten:

- Taktverdichtung durch zusätzliche Fahrten (entweder auf der gesamten Linie oder nur auf einer Teilstrecke)
- Einsatz längerer Züge (entweder durch Kuppeln von Fahrzeugen oder Verwendung größerer Fahrzeuge)

Die Unterschiede zwischen den Systemen sind daneben jedoch in zahlreichen weiteren Aspekten zu finden, auf die nachfolgend eingegangen wird.

Zur Herstellung einer Vergleichbarkeit und Herausarbeitung der Unterschiede werden zunächst Kriterien definiert, die dies ermöglichen.[31] Die einzelnen Vergleichskriterien werden anschließend aufgegriffen in der Klassifizierung von Verkehrsangeboten. Die Ergebnisse des Vergleichs definieren dabei den Wertebereich und ermöglichen eine Einordnung der einzelnen Systeme im Vergleich.[32]

3.1. Vergleichsmethode

Der qualifizierte Vergleich von Verkehrssystemen und -angeboten ist nur bei vergleichbaren Randbedingungen möglich.[33] Die im weiteren Verlauf betrachteten Systeme bieten diese zu-

[31] Dabei soll die Vergleichbarkeit gewährleistet werden und kein dem in der Einleitung, Abschnitt 2 auf Seite 2, verwendeten Bild des Vergleichs von Äpfel und Birnen entsprechendes Ergebnis entstehen.

[32] Die konkrete Beschreibung ausgewählter Systeme anhand dieser Kriterien folgt im anschließenden Kapitel 4, der eigentliche Vergleich sowie die Einordnung im Kapitel 5.

[33] Vgl. dazu Etzold u. Schröter (2006, S. 36).

mindest bei abstrakter Betrachtung nicht in allen Bereichen.[34] Daher wird trotz Vorliegen monetarisierter bzw. quantifizierter Vergleichskriterien keine *echte* Bewertung durchgeführt, sondern die erarbeiteten Kriterien innerhalb der einzelnen Teilbereiche *Angebot und Nachfrage*,[35] *Betrieb* und *Wirtschaftlichkeit* jeweils bezogen auf die anderen Systeme eingeordnet.

Der Aufbau und die Skala orientieren sich dabei an der Methode der Nutzwertanalyse (NWA). Diese bietet die Möglichkeit, sowohl quantitative als auch qualitative Bewertungen zusammenzuführen. Die Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) monetarisiert alle zu bewertenden Aspekte, wird für einen Betrachtungszeitraum bestimmt und stellt den Kosten den Nutzen im gleichen Zeitraum gegenüber. (Dahl u. a. 2016, S. 50) Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA) monetarisiert ebenfalls alle Punkte und skaliert zusätzlich mit dem Nutzen. Im Gegensatz zu NKA und KWA bietet eine NWA die Möglichkeit, auch ohne Monetarisierung aller Punkte[36] eine vergleichende Bewertung in einem System durchzuführen.[37] (o.A. 2016c, S. 312) Anstelle des Nutzens sollen die in Kapitel 196 zusammengetragenen Vergleichswerte verwendet werden.

Eine NWA baut sich in mehreren gewichteten Stufen, den sogenannten Ober- und Unterzielen, auf. Analog zu den Oberzielen einer NWA werden im Rahmen der nachfolgend durchgeführten Beschreibung die drei eingangs[38] genannten Ziele *Betrieb*, *Angebot und Nachfrage* und *Wirtschaftlichkeit* verwendet. Darunter sind entsprechend der Unterziele einer NWA die einzelnen Vergleichskriterien gruppiert. Sie werden nachfolgend im Abschnitt 3.2 erarbeitet und anschließend zusammenfassend in Abschnitt 3.3 sowie insbesondere in den Tabellen 3.2.1 bis 3.2.5 dargestellt. Die Beschreibungsparameter sind nicht disjunkt und einige Quelldaten finden Eingang in verschiedene Parameter bzw. beeinflussen deren Ausprägung. Damit können die zur Darstellung der Ergebnisse verwendeten Polardiagramme[39] nur einen Eindruck der Differenzierung liefern, nicht jedoch einen aussagekräftigen Punktwert.

[34] Siehe detaillierter in den einzelnen Beschreibungen der Parameter in Abschnitt 3.2 auf der nächsten Seite.
[35] Dieser Bereich wird fortan als *Verkehr* bezeichnet.
[36] Wenngleich viele der gewählten Vergleichsparameter monetarisiert werden können, wie die Darstellungen in Kapitel 3.2 zeigen, ist dies aufgrund der Unzugänglichkeit unternehmensinterner Daten nicht in allen Fällen möglich. Zudem wird bei einer Reihe von Vergleichskriterien der (dimensionslose) Quotient zwischen zwei Zuständen - meist HVZ und NVZ - betrachtet, der nicht monetarisierbar ist.
[37] Nicht monetarisierbare Aspekte werden bei einer NKA in zusätzlichen Bewertungen behandelt. Im Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030 wurden neben der NKA eine umwelt- und naturschutzrechtliche Beurteilung, eine raumordnerische Beurteilung sowie eine städtebauliche Bewertung vorgenommen. (o.A. 2016a, S. 58ff.)
[38] Vgl. Abschnitt 1.2 auf Seite 2.
[39] Siehe Beschreibung in Abschnitt 3.3 sowie dort die Abbildung 3.3.2.

3.2. Vergleichssparameter

Um die einzelnen vorgestellten Prinzipien zur Angebotsverdichtung miteinander vergleichen zu können, werden Kriterien eingeführt, anhand derer ein plausibler Vergleich der sehr unterschiedlichen Konzepte möglich ist.

Die Kriterien decken alle vier Dimensionen der von Weidmann (2013b, S. 10) genannten Steuerungsgrößen ab:

- *Angebot* - Ausgestaltung des Verkehrsangebotes
- *Produktion* - Produktionsprozess und Ressourceneinsatz
- *Rollmaterial* - Zugbildung, Fahrzeugkonzepte
- *Infrastruktur* - Zugsicherung, verfügbare Infrastruktur

Gegliedert werden sie in verkehrliche, betriebliche sowie wirtschaftliche Kriterien. Dabei sind auch die die Systeme charakterisierenden Randbedingungen - beispielsweise in Form der Netzausdehnung und Anzahl Endstellen - in den entsprechenden Bereichen Teil der Betrachtung.

Sämtliche nachfolgend definierten Vergleichskriterien beziehen sich, sofern sie auf Fahrten basieren, auf eine Fahrtrichtung. Dies ist in der Regel die Hauptlastrichtung in der morgendlichen HVZ. Die Gegenrichtung findet ebenfalls Beachtung: Eine Verdichtung des Verkehrsangebotes über mehrere Stunden hat ein Ungleichgewicht der Fahrzeuge zur Folge, so dass diese entgegen der Lastrichtung zum Ausgangspunkt zurückkehren müssen. Dies kann durch Leerfahrten oder Fahrgastfahrten, die in der Regel schwächer ausgelastet sind, erfolgen.

Als Bezugspunkt wird der zentrale Ort des Netzes gewählt. In Netzen mit polyzentrischem Charakter des zentralen Bereiches werden mehrere derartige zentrale Orte gewählt.

Zur Schaffung einer gemeinsamen Basis werden die Verdichtungszeiten einem Grundangebot gegenübergestellt, das als NVZ bezeichnet wird. Diese Zeiten mit Grundangebot sind in der Regel[40] die Tageszeiten außerhalb der HVZ - in den meisten Systemen die Stunden zwischen 10 und 14 Uhr sowie zum Teil auch der frühe Abend.

Bei Aspekten mit unterschiedlichen Ausprägungen innerhalb eines Netzes - beispielsweise pro Linie oder Streckenast - werden die Werte mit ihrem Minimum und Maximum erfasst sowie der Median ermittelt. Dieser ist insbesondere bei großen Streuungen aussagekräftiger als der Mittelwert, der durch einen einzelnen heraus stechenden Wert verzerrt würde.

[40] Ausnahmen werden gesondert genannt.

Die Vergleichskriterien sind dort quantitativ, wo es messbare bzw. berechenbare Größen gibt. Dies betrifft beispielsweise das Platzangebot, die Anzahlen an Zugfahrten und Streckengleisen oder die Reisezeiten. Andere Dimensionen sind hingegen nur qualitativ zu erfassen wie das eingesetzte Zugbeeinflussungssystem. Die erfassten Größen werden am Ende der Klassifizierung in Abschnitt 5 gegenüber gestellt. Sofern möglich, werden dabei Diagrammdarstellungen gewählt, die mehrere zusammengehörende Aspekte kombiniert und vergleichbar darstellen, um zusammenfassend analysiert zu werden.

3.2.1. Verkehrliche Beschreibung

Die erste von Weidmann (2013b, S. 10) genannte Steuerungsgröße ist das *Angebot*. Dieses dient primär der Befriedigung der verkehrlichen Bedürfnisse. Es charakterisiert sich vor allem durch die angebotenen Fahrten. Detaillierter betrachtet lassen sich jedoch weitere Merkmale herausarbeiten wie das Platzangebot, die Zahl der Stationshalte sowie die Verteilung der Fahrten und das daraus resultierende Platzangebot über die Zeit. Den zweiten Aspekt bildet die Qualität, die sich der EN 13816[41] folgend neben anderen Aspekten über den Takt, die Zugänglichkeit, den Komfort und die Zeit bemisst. Dazu zählen die Reisezeit sowie die Umsteigeerfordernisse.

3.2.1.1. Platzangebot

Die Wirtschaftlichkeit eines Verkehrsangebotes lässt sich unter anderem durch den von Götz u. a. (1968, S. 26) beschriebenen *Verkehrswirkungsgrad* beschreiben, der sich als Quotient der Platzkilometer pro angebotener Personenkilometer errechnet. Da Nachfragedaten vertraulich behandelt werden und selbst bei öffentlich finanzierten und bestellten Verkehren in der Regel in Deutschland nicht frei zugänglich sind bzw. bei einer Weitergabe durch Betreiber oder Besteller größter Geheimhaltung unterliegen, ist ein Vergleichskriterium zu suchen, das eine möglichst gute Annäherung an die Nachfrage bietet und dennoch ohne diese sensiblen Daten auskommt.[42]

Ein sinnvoll erscheinender Parameter ist das Sitzplatzangebot in den Zügen. Davon ausgehend, dass bestehende Verkehre heutzutage unter großem wirtschaftlichen Druck geplant und durchgeführt werden, ist eine Korrelation zwischen dem Platzangebot und der Nachfrage zu erwarten. (Dilba u. Künzel 2011, S. 28) Ferner erfolgte die Abgrenzung des Themas derart,[43]

[41] Diese Norm definiert die Kundenzufriedenheit im Personenverkehr. Sie dient dem Nachweis der Servicequalität von Verkehrsunternehmen im öffentlichen Personenverkehr.
[42] Vgl. Anmerkungen bei Walf (2008, S. 102f.) und Dilba u. Künzel (2011, S. 28).
[43] Vgl. Ausführungen in Abschnitt 1.2.

dass primär die Spitzenstunden betrachtet werden, in denen die Nachfrage besonders hoch und das Angebot stark ausgelastet ist.[44] Daher erscheint die Annahme plausibel, das vorhandene Platzangebot anstelle der (nicht verfügbaren) Nachfrage zu verwenden. Problematisch sind hier Linienenden, da das Platzangebot meist nach den am stärksten belasteten Abschnitten dimensioniert wird.[45] Die ausschließliche Betrachtung der Sitzplätze vermeidet eine Verzerrung der Werte durch in verschiedenen Systemen unterschiedlich definierte Stehplatzdichten.[46]

Walf (2008, S. 102f.) führt einen Quotient von Fahrgästen je Querschnitt pro Tag und Zugpaar je Stunde ein, den er für verschiedene Systeme getrennt nach HVZ und NVZ (Grundangebot) bestimmt. Für die im Rahmen dieser Arbeit stattfindende Analyse von Verdichtungen des Verkehrsangebotes erscheint eine Herausstellung des Verstärkungsfaktors relevant. In Anlehnung an Walf wird daher der Quotient aus der Anzahl der Sitzplätze pro Stunde in der HVZ sowie der Anzahl der Sitzplätze pro Stunde in der NVZ für jeden einzelnen Abschnitt bestimmt. Da der Quotient naturgemäß ein dimensionsloses Verhältnis darstellt, ist es unerheblich, welche exakten Platzzahlen bei den einzelnen vorgestellten Konzepten berücksichtigt werden, solange innerhalb eines Quotientes im Zähler wie im Nenner die gleiche Platzbasis Verwendung findet.

Zu beachten ist allerdings daneben die Wirkung von abschnittsweisen Expressfahrten, die zwar auf einem Querschnitt ein Platzangebot bieten, jedoch nicht alle Zwischenhalte bedienen. Daher wird der Quotient nur für die an einer Station haltenden Fahrten betrachtet, so dass im Vergleich mit der Anzahl der Halte[47] erkennbar wird, wie gleichartig die Verdichtung ist.

Der im weiteren Verlauf der Arbeit als *Quotient des Platzangebotes* (η_P) bezeichnete Quotient für eine Station a pro Stunde bildet sich entsprechend für alle haltenden i Fahrten in der HVZ H und j Fahrten in der NVZ N wie folgt:

$$\eta_P(a) = \begin{cases} \frac{\sum^{i}(n_{\text{Plätze } H\ i})}{\sum^{j}(n_{\text{Plätze } N\ j})} & , \text{ mit Angebot in der NVZ} \\ 0 & , \text{ ohne Angebot in der NVZ} \end{cases} \tag{3.2.1}$$

[44] Vgl. dazu Kittler (2010, S. 14ff.) sowie die Darstellungen etypischer Tagesganglinien bei Storchmann (1999, S. 62) und Boltze u. Kittler (2011, S. 7). Beachte dazu auch die Feststellung von Juhnke (1966c, S. 201): *„ Die Eisenbahnen versuchen, ihr Platzangebot an sich fortlaufend ändernde Nachfrageverhältnisse durch die Änderung des Zugabstandes sowie durch die Änderung der Zuglängen anzupassen.“*

[45] Vgl. dazu auch Walf (2008, S. 104f.). Beispiele im Großraum Berlin-Brandenburg zeigen jedoch auch, dass diese *Linienenden* mitunter mehrere 100 km lang sind: Die Berlin durchquerenden Regionalverkehrslinien weisen ein Platzangebot auf, das zur Abdeckung der Nachfrage im Land Berlin dimensioniert ist. Auf den außerhalb Berlins liegenden Streckenabschnitten ist die Nachfrage wesentlich geringer. So wäre die Nachfrage von etwa 750 Fahrgästen pro Stunde (beide Richtungen) auf der sogenannten *Anhalter Bahn* durch eine Linie mit der eingesetzten Zuglänge abzudecken. Das heutige Sitz- und Stehplatzangebot zweier vierteiliger Doppelstockzüge mit insgesamt etwa 2400 Plätzen pro Stunde in beide Richtungen zusammen liegt weit über dieser Nachfrage, wie die Nachfrageanalyse in Scherbarth (2013) zeigt.

[46] Als Beispiel: Ahlbrecht u. a. (1997, S. 46ff.) nennen sechs Personen pro Quadratmeter bei der Berliner S-Bahn und vier Personen pro Quadratmeter für S-Bahnen der Baureihe 423. Auch STIF (2005, S. 12) nennt vier Personen pro Quadratmeter für das Réseau Express Régional (RER) in Paris.

[47] Vgl. hierzu Abschnitt 3.2.1.2.

η_P ergibt sich entsprechend zu 1, wenn in HVZ und NVZ eine Station mit unverändertem Fahrten- und Platzangebot bedient wird. Eine doppelt so große Anzahl an Fahrten mit halber Zuglänge bringt entsprechend keine Veränderung des Quotienten. Bei einem Quotient von 2 erhöht sich entsprechend das Platzangebot durch die Verstärkerfahrten oder eine Verlängerung der Fahrzeuge um 100%. Auf Abschnitten, die ausschließlich in der HVZ befahren werden, wird der Quotient zu 0 definiert. In den Erläuterungen zu den einzelnen Prinzipien kann dieses η_P für jede Station eines Netzes bzw. einer Linie bestimmt werden.

Zu beachten ist, dass dieser Quotient des Platzangebotes lediglich eine Aussage über das Verhältnis des Platzangebotes zwischen dem Grundangebot und den Leistungen in der HVZ trifft, wie sie detaillierter in Tagesganglinien der Nachfrage dargestellt werden. Die verschiedenartige Verteilung von Aufkommensschwerpunkten entlang eines Linienverlaufes bleibt unberücksichtigt. Dazu wäre ein weiteres Kriterium einzuführen, das die Aussagekraft des Quotienten des Platzangebotes erweitert um eine Gewichtung nach der geographischen Verteilung der vorhandenen Nachfrage. Dies würde jedoch verwertbare Aussagen zur tatsächlichen Nachfrage inklusive Quelle-Ziel-Relationen erfordern, die bei den meisten verglichenen Systemen von den Betreibern und Bestellern unter Verschluss gehalten werden.[48]

Die Wirkung eines erhöhten Platzangebotes wird zudem beeinflusst durch die Streckenlänge, auf der dieses Angebot zur Verfügung steht. Unabhängig von dem Haltekonzept bestimmt sich die Verkehrsangebotsleistung aus dem Platzangebot auf einer Strecke i multipliziert mit ihrer Länge l.[49] Wie zuvor beim Platzangebot wird auch dieser Wert im Verhältnis zwischen HVZ (H) und NVZ (N) betrachtet, ausgedrückt als *Quotient der Verkehrsangebotsleistung* (η_V):

$$\eta_V(a) = \begin{cases} \frac{\sum^{i}(n_{\text{Plätze } H\ i})}{\sum^{j}(n_{\text{Plätze } N\ j})} & , \text{ mit Angebot in der NVZ} \\ 0 & , \text{ ohne Angebot in der NVZ} \end{cases} \tag{3.2.2}$$

Bei Systemen, in denen alle Züge an allen Stationen ihrer Strecke halten, entspricht dieser Quotient dem zuvor definierten Quotient des Platzangebotes. Bei Vorhandensein von Expressfahrten steht das Platzangebot auf der Strecke nicht an allen Stationen zur Verfügung, so dass die Verkehrsangebotsleistung höher ist.

[48] Ein positives Beispiel ist der später in Abschnitt 4.7 auf Seite 162 behandelte *Caltrain* in San Francisco, wo eine detaillierte Nachfrageanalyse frei verfügbar im Internet steht: o.A. (2014b).

[49] Gebräuchlicher ist die von Götz u. a. (1968, S. 27) als *„Verkehrsarbeit, das heißt ... geleistete[n] Personenkilometer[n]“* und heutzutage in der Regel als Verkehrsleistung bezeichnetete Größe. Sie würde die zuvor angesprochenen detaillierten Nachfragedaten erfordern, dann jedoch neben dem Angebot erweiterte Aussagen zum Nutzen des verstärkten Angebotes liefern.

Um die zu vergleichenden Netze in ihrer Bedeutung klassifizieren zu können, wird neben dem Quotienten auch die *absolute Verkehrsangebotsleistung pro Strecke s* als P_V in der HVZ erhoben:

$$P_V = n_{\text{Plätze } H\ s} \cdot l_s \tag{3.2.3}$$

Für die Höhe von Stationsentgelten kann außerdem noch die Länge der Züge von Relevanz sein.[50] Dasselbe Sitzplatzangebot kann in Doppelstockzügen auf einer geringeren Zuglänge untergebracht werden. Dieser Aspekt wird im weiteren Verlauf jedoch nicht weiter betrachtet, da diese Thematik unabhängig von Verdichtungsmöglichkeiten des Verkehrsangebotes eine eigene Betrachtung wert ist.

3.2.1.2. Anzahl der Stationshalte

In Systemen, die differenzierte Halteregime[51] haben, wird als weiteres Vergleichskriterium das *Verhältnis von Stationshalten* (η_S) herangezogen. Die Betrachtung erfolgt wie zuvor normiert und zusammengefasst für gleichartige Stationen. Der Quotient bestimmt sich durch die Halte an einer Station a in der HVZ (H) und die Zahl der Stationshalte in der NVZ (N):

$$\eta_S(a) = \begin{cases} \frac{\sum^i (n_{Halte\ H\ i})}{\sum^j (n_{Halte\ N\ j})} & , \text{ mit Angebot in der NVZ} \\ 0 & , \text{ ohne Angebot in der NVZ} \end{cases} \tag{3.2.4}$$

Verstärkerfahrten, die Halte auslassen, erhöhen zwar den Quotient der Zugfahrten $\eta_F(a)$,[52] verändern jedoch nicht das Verhältnis der Stationshalte. Sofern Züge des Grundangebotes in der HVZ Halte auslassen, die in gleicher Zahl von zusätzlichen Zügen bedient werden, ist keine Veränderung bei η_S festzustellen.

Die Anzahl der Stationshalte ist für die Fahrgäste ein leicht wahrnehmbares Qualitätskriterium. Verkehren auf einer Strecke in der HVZ doppelt so viele Fahrten wie im restlichen Tagesverlauf, nimmt der Fahrgast die Verdoppelung nur wahr, wenn auch an *seiner* Station entsprechend mehr Züge halten. Zu bemerken ist jedoch auch, dass trotz ausgelassener Halte nicht nur die Fahrgäste der häufiger bedienten Halte profitieren: Bei gleicher Fahrgastzahl stehen den

[50] Das deutsche Stationspreissystem enthält einen sogenannten Zuglängenfaktor. Vgl. I.SVP (2010, S. 10).

[51] Dabei ist es unerheblich, ob diese innerhalb einer Produktkategorie (z. B. S-Bahn) bestehen oder sich diese durch unterschiedliche Verkehrsprodukte (z. B. S-Bahn mit überlagerndem Regional- oder Fernverkehr) ergeben.

[52] Siehe Abschnitt 3.2.2.5.

Fahrgästen der ausgelassenen Halte mehr (freie) Plätze zur Verfügung, da ein Teil der Fahrgäste in den diesen Halt auslassenden Zügen fährt und somit Kapazität in den *Stammzügen*, die überall halten, freigeben.

3.2.1.3. Verteilung der Zugfahrten

Fahrplanauskunftsysteme[53] geben als Ergebnis in der Regel die auf Basis der Suchkriterien beste Verbindung aus. Die Auslastung von Zügen spielt dabei (heutzutage noch) keine Rolle.[54] Aufgrund optimierter Anschlussbeziehungen bei ganztägig verkehrenden Zügen[55] führt dies oft zu einer übermäßigen Nutzung dieser Züge und einer schwächeren Auslastung der Verstärkerzüge, die entweder außerhalb des Taktes fahren oder zumindest nicht dieselben guten Anschlüsse bieten wie die Stammzüge.

Walf (2008, S. 95) zeigt in der Auswertung seiner Fahrgastzustrombeobachtung an der Station Biesdorf der Berliner S-Bahn, dass es durchaus Verdrängungseffekte gibt, die dazu führen, dass die Reisenden an ihrer Einstiegsstation bereits sehr volle Züge meiden und in der Regel schwächer ausgelastete Züge nutzen. Er bestätigt jedoch die Ausführungen aus Blome (2007, S. 20f.), dass die HVZ-Verstärker, die einen kürzeren Laufweg haben und fünf Minuten vor bzw. nach den Stammzügen verkehren, deutlich schwächer nachgefragt werden.[56]

Weidmann (1994, S. 56ff.) stellt heraus, dass sich der Fahrgastwechsel bei Überschreitung eines kritischen Besetzungsgrades verzögert. Um derartige Verzögerungen durch Rückstau beim Ein- und Ausstieg zu vermeiden, bietet sich eine alternierende Bedienung oder eine abschnittsweise Expressführung von Zügen auf einem Streckenast an.[57]

Heinrich (2014, S. 31) nennt die drei in Abbildung 3.2.1 dargestellten Grundmuster für die Bedienung von Außenästen mit abschnittsweise Verdichtung und Expressfahrten:

- Als *innenstadtsynchron* bezeichnet er einen glatten Takt zwischen Expressfahrten und überall haltenden Fahrten auf der innerstädtischen Stammstrecke. Zur Verdichtung an den vom Express ausgelassenen Stationen verkehrt in diesem Bereich bis zur Stammstrecke eine weitere an allen Stationen haltende Linie.

[53] Vgl. auch Abschnitt 5.1.3.
[54] In der Onlineauskunft der Schweizerische Bundesbahnen (SBB) werden mittlerweile als zusätzliche Information erwartete Besetzungsgrade ausgegeben. Auch die Auskunft der Deutsche Bahn AG (DB AG) gibt seit einiger Zeit bereits Hinweise auf eine erwartete hohe Auslastung.
[55] Ein Beispiel sind die Stammzuggruppen bei der Berliner S-Bahn.
[56] Vgl. auch 220 auf Seite 82.
[57] Vgl. ausführlichere Betrachtung dieses Aspektes in Abschnitt 3.2.2.6.2 auf Seite 46.

- Im *außenstadtsynchronen* Konzept ergibt die Expresslinie mit der überall haltenden Linie im Außenstadtbereich einen glatten Takt, in dem beide Linien das gleiche Haltemuster haben. Im Bereich der Expressbedienung verkehrt eine Verstärkerlinie mit Halt an allen Stationen. Auf der Stammstrecke ergibt sich so eine ungleiche zeitliche Verteilung der von diesem Korridor kommenden Fahrten.

- Das *kombinierte* Modell führt im Innenstadtbereich sowie im Außenbereich zu einem glatten Takt. Erreicht wird dies durch Zurückziehen der überall haltenden Linie bis zu der Station vor Beginn der Expressbedienung. Die Verstärkerlinie übernimmt die Bedienung im Außenbereich und schafft dort einen glatten Takt.

Heinrich (2014, S. 31f.) arbeitet weiter heraus, dass das außenstadtsynchrone Modell vor allem bei Führung von zwei Linien im Außenbereich sinnvoll ist, um einen gleichmäßigen Takt zu bieten. Bei Bedienung des Außenbereichs mit nur einer Linie empfiehlt Heinrich hingegen - dem Pariser Vorbild folgend - knappe Übergänge zwischen dem Expresszug und dem am letzten Bahnhof vor der Expressbedienung einsetzenden Verstärker, um die auf diesen Relationen geschaffenen Umsteigezwänge abzumildern.

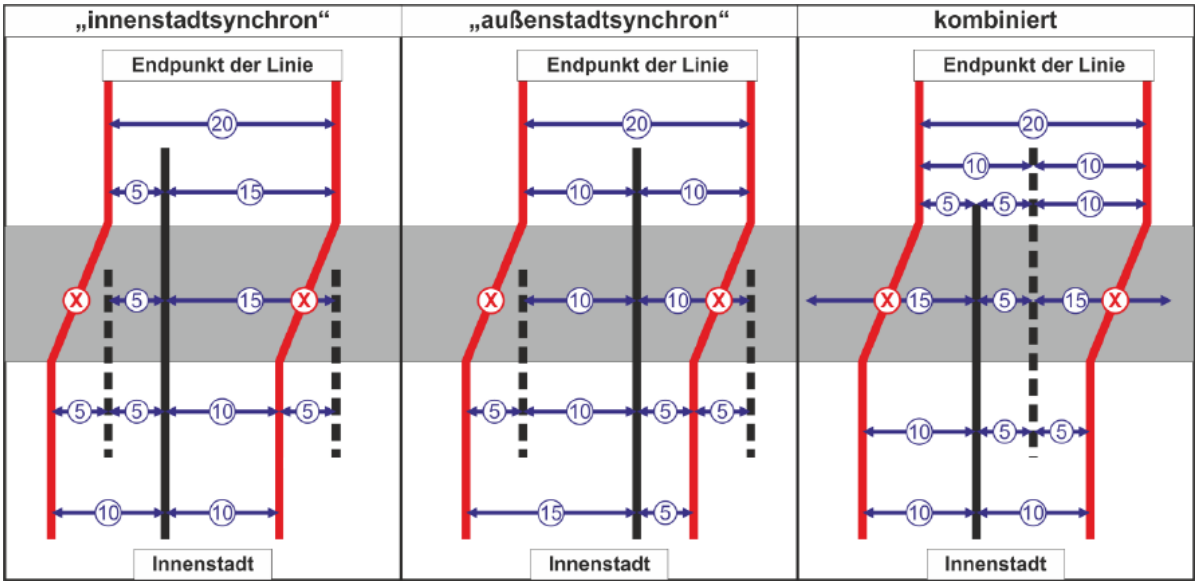

Abbildung 3.2.1: Mögliche Taktraster auf einem Modellkorridor mit Expressbedienung und Verstärkerfahrten [modifizierte Darstellung aus Heinrich (2014, S. 31)].

Die Trassenlage auf der Stammstrecke ist insoweit relevant, als dass eine ungleichmäßige Fahrtenfolge dort durch andere (dann ebenfalls ungleichmäßig verkehrende) Linien ausgeglichen werden muss. Als derartige *Lückenfüller* bieten sich Linien an, die nur mit einer Zuggruppe verkehren. Walf (2008, S. 182) zeigt jedoch auch, wie sich auf dicht befahrenen Strecken un-

terschiedliche Rhythmen überlagern können, sofern sie jeweils ein Vielfaches der maßgebenden Mindestzugfolgezeit sind. Bei sehr dichten Zugfolgen spielt die exakte Verteilung eine geringere Rolle.

Für die vorzunehmende Bewertung von Verstärkerleistungen ist die zeitliche Verteilung sowie die Homogenität des Platzangebotes relevant.[58] Folgen die Verstärkerfahrten direkt den Stammfahrten, so ist davon auszugehen, dass die Stammfahrten eine deutlich stärkere Nachfrage erfahren und die Verstärker überwiegend nur die zurückgebliebenen und zu spät an der Station ankommenden Fahrgäste auffangen. Verkehren die Verstärker knapp vor der Stammfahrt, werden sie größere Teile der Nachfrage mitnehmen. Denn nach Walf (2008, S. 93ff.) richten viele Fahrgäste, die nicht von einem zubringenden Verkehrsmittel kommen und somit ihre Zugangszeit individuell beeinflussen können, ihre Ankunft auf den Grundtakt aus. Zubringerlinien - insbesondere in schwächer besiedelten Gebieten - sind in der Regel auf den Grundtakt[59] und nicht auf die Verstärkertakte ausgerichtet. Luethi u. a. (2007, S. 3) führen Studien an, die fahrplankundige und -unkundige Fahrgäste unterscheiden. Erstere kommen - wie auch von Walf festgestellt wurde - an der Zugangsstation unter Berücksichtigung von Pufferzeiten in großer zeitlicher Nähe zur Abfahrt an. Die den Fahrplan nicht kennenden Fahrgäste hingegen erreichen mit großer zeitlicher Streuung die Zugangsstation. Letztere würden somit bei einer gleichmäßigen zeitlichen Verteilung der Fahrten - beispielsweise einer Halbierung des Grundtaktes - diese Züge auch gleichmäßiger auslasten. Die Ankunftszeiten beider Gruppen lassen sich logarithmisch approximieren. (Luethi u. a. 2007, S. 6, Abb. 2) Diese Approximation zeigt, dass bei einer dichten Zugfolge auch fahrplankundige Fahrgäste *nicht fahrplankundiges* Verhalten zeigen - gemeint ist eine eher zufällige Verteilung -, so dass beide Gruppen zusammen bei einer Halbierung der Zeit zwischen zwei Fahrten bei dichtem Takt eine relativ gleichmäßige Verteilung auf beide Fahrten liefern würden. Müller (1981, S. 33) hatte schon früher festgestellt, dass bis zu Zugfolgezeiten *„von 5 Minuten [...] Abweichungen von konstantem Fahrgastzufluss“* nicht festzustellen seien. Ferner kam er zu dem Ergebnis, dass in der morgendlichen HVZ bei höheren Zugfolgezeiten die Fahrplanabhängigkeit deutlich ausgeprägter ist als im nachmittäglichen Verkehr. Die Fahrgäste scheinen also am Morgen mit höherer zeitlicher Präzision die Abfahrtshaltestelle zu erreichen als am Nachmittag. Abschließend schreibt Müller (1981, S. 33), dass die *„Merkbarkeit der Kursfolgezeiten [eine] zentrale Rolle“* spielt.

Eine detaillierte Beschreibung der zeitlichen Verteilung der Zugfahrten hat Walf (2008, S. 50ff.) eingeführt als eine der Musik entlehnte Übertragung als *Rhythmus im Takt*. Walf übersetzt dabei die Fahrten eines Fahrplantaktes in betonte Zählzeiten eines Taktes der Musik.

[58] Siehe Abschnitt 3.2.1.4.

[59] Gemeint ist das den ganzen Tag über bestehende Verkehrsangebot.

Bei Systemen mit abschnittsweisen Expressfahrten müsste die Angabe des Rhythmus für jede einzelne Station bzw. jedes Stationscluster mit einheitlicher Bedienung getrennt erfolgen. Ferner ist diese Darstellungsform nur für Vergleiche anwendbar, wenn alle betrachteten Systeme derartige rhythmische Züge haben. Das ist jedoch - ohne zu sehr vorzugreifen - in einzelnen in Kapitel 196 vorgestellten Systemen nicht der Fall.

Zur Vergleichbarkeit ist ein quantifizierbarer Wert den Rhythmus-Angaben von Walf vorzuziehen. Vromans (2005, S. 118f.) führte einen solchen in Form des Sum of Shortest Headway Reciprocals (SSHR)[60] ein. Er bezieht sich dabei auf zyklische Fahrpläne und drückt damit die Heterogenität und Verteilung der Zugfahrten auf ein Zeitintervall (üblicherweise eine Stunde) aus. Dabei erfolgt jedoch keine Unterscheidung zwischen kürzester Zugfolge am Anfang oder am Ende des Abschnittes, was zumindest mit Blick auf die Betriebsqualität und -stabilität nur bedingt sinnvoll erscheint. Daher ergänzte Vromans (2005, S. 119f.) die Sum of Arrival Headway Reciprocals (SAHR).[61]

$$\mathrm{SSHR} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{h_i^-} \tag{3.2.5}$$

$$\mathrm{SAHR} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{h_i^A} \tag{3.2.6}$$

Für die vorliegende Analyse sind jedoch auch diese Werte nicht von Nutzen, da sie für den Vergleich unterschiedlicher Fahrpläne auf derselben Infrastruktur bestimmt sind und nachfolgend unterschiedliche Systeme mit naturgemäß unterschiedlicher Infrastruktur verglichen werden sollen.

Zum Vergleich werden daher zunächst die unterschiedlichen Abstände zwischen zwei Abfahrten an jeder Station ermittelt und anschließend daraus für jede Station das Mittel sowie der Variationskoeffizient ν_Z ermittelt. Letzterer ist bei besonders stark streuenden Zeiten größer und zeugt daher von größerer Heterogenität des Fahrplans. Es gilt:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (t_{Abf,i} - \overline{t_{Abf}})^2 \tag{3.2.7}$$

$$\nu_Z = \frac{s}{\overline{t_{Abf}}} \tag{3.2.8}$$

[60] Summe der Reziproken der kürzesten Zugfolgezeit, vgl. Formel 3.2.5.
[61] Summe der Reziproken der Ankunftszufolgezeiten, vgl. Formel 3.2.6.

3.2.1.4. Verteilung des Platzangebotes

Die Ausführungen des vorhergehenden Abschnitts 3.2.1.3 zeigen, dass die Verteilung der Zugfahrten innerhalb eines Intervalls relevant ist. Die Verteilung der Fahrgäste in Abhängigkeit der zeitlichen Lage der einzelnen Fahrten führt zu einem weiteren zu erfassenden Parameter: der Verteilung des Platzangebotes.

Verstärkungsfahrten mit deutlicher Diskrepanz des Platzangebotes - beispielsweise durch abwechselnd verkehrende Lang- und Kurzzüge - stehen zum Teil im Widerspruch zu den zuvor in Abschnitt 3.2.1.3 zitierten Erkenntnissen von Luethi u. a. (2007) zum Fahrgastzustrom. Die Homogenität des Platzangebotes ist von Bedeutung, da die Wirkung einer Verstärkerfahrt mit kleinem zusätzlichem Platzangebot eine andere ist, als wenn durch sie das Platzangebot verdoppelt oder gar noch stärker erweitert wird durch sehr lange Verstärkungszüge.

Dem zuvor im Abschnitt 3.2.1.3 vorgestellten Variationskoeffizient der Abfahrtsabstände entsprechend wird die Verteilung des Platzangebotes zunächst über den Betrag der Differenz des Platzangebotes zweier aufeinanderfolgender Abfahrten ermittelt und fortan als $\nu_{\Delta P}$ bezeichnet.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(|\Delta N_{P,i}| - |\overline{\Delta N_P}| \right)^2 \tag{3.2.9}$$

$$\nu_{\Delta P} = \frac{s}{|\overline{\Delta N_P}|} \tag{3.2.10}$$

In Systemen mit sich regelmäßig abwechselndem Platzangebot ergibt sich $\nu_{\Delta P} = 0$, da alle Differenzen identisch sind. Um diesen Fall von Fällen mit absolut identischem Platzangebot unterscheiden zu können, wird als zweite Verteilung der Variationskoeffizient des Platzangebotes ν_P erfasst. Dieser beträgt nur im Falle wirklich identischer Platzangebote 0.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(|N_{P,i}| - |\overline{N_P}| \right)^2 \tag{3.2.11}$$

$$\nu_P = \frac{s}{|\overline{N_P}|} \tag{3.2.12}$$

3.2.1.5. Attraktivitätsindex

Neben der reinen Betrachtung der Reisezeit[62] fließen weitere Aspekte in die subjektive Bewertung einer Verbindung durch den Reisenden.

Nach Bertard (2013, S. 40ff.) lässt sich aus den Reisekosten, der Reisezeit, dem Komfort, der Flexibilität sowie der Entfernung zwischen Start und Ziel ein Attraktivitätsindex ermitteln. Bertard beschränkt sich in seiner Arbeit auf den SPFV. Es erscheint jedoch plausibel, die gleiche Bewertungsmethodik mit einer Korrektur hinsichtlich der Umsteigeaufwände auch im SPNV anzuwenden. Dabei fließen die in Abschnitt 3.2.1.7 definierten Umsteigeanzahlen und Wartezeiten in die Betrachtung ein. Bertard (2013, S. 41) definiert den Attraktivitätsindex wie folgt:

$$AI_i = \frac{W_i}{L_i} \tag{3.2.13}$$

Dabei ist:

- AI_i Attraktivitätsindex der Verbindung i [in Euro pro Kilometer]
- W_i Fahrwiderstand der Verbindung i [in Euro]
- L_i Länge der Verbindung i als Luftlinie [in Kilometer]

Den Fahrwiderstand der Verbindung in Formel 3.2.13 beschreibt Bertard (2013, S. 41) wie folgt:

$$W_i = F_i + ZW \cdot (FZ_i + WZ_i + U_i \cdot UW) \tag{3.2.14}$$

Dabei ist:

- F_i Fahrpreis der Verbindung i [in Euro]
- ZW Zeitwert [in Euro pro Stunde]
- FZ_i Fahrzeit der Verbindung i [in Stunde]
- WZ_i Wartezeit der Verbindung i [in Stunde]
- U_i Umsteigezahl der Verbindung i
- UW Umsteigewiderstand [in Stunde]

[62] Vgl. dazu Abschnitt 3.2.1.6.

Aufgrund geringerer Entfernungen und Gesamtreisezeiten werden Wartezeiten beim Umsteigen negativer bewertet. Aufgrund des gleichen Gewichts in Formel 3.2.14 ist somit die Relevanz der Wartezeiten genau so hoch wie jene der Reisezeit.[63]

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Betrachtung der Hauptlastrichtung. Verbindungen mit Fahrtabschnitten entgegen der eigentlichen Fahrtrichtung können den Ausführungen in Abschnitt 3.2.1.6 zur Verbindungssuche für die Reisezeit folgend bei den ermittelten Verbindungen enthalten sein. Tarifliche Analysen der untersuchten Netze würden jedoch den Rahmen der Arbeit sprengen und für den hier vorliegenden Fall nur in besonderen Ausnahmefällen von Relevanz sein.[64] Auch Expresszuschläge, die in Fahrten erhoben werden, die Zwischenhalte auslassen,[65] könnten lenkende Wirkung haben und die Attraktivität reduzieren. Auf eine Erhebung von Expresszuschlägen wird - an dieser Stelle sei vorgegriffen auf die Betrachtungen in Abschnitt 4 - in allen untersuchten Netzen verzichtet.[66] Damit ist der Fahrpreis in der vorliegenden Arbeit ohne Einfluss und wird weggelassen.

Im Fokus stehen Verdichtungen in der HVZ. Somit handelt es sich bei den Reisenden überwiegend um Berufspendler auf dem Arbeitsweg. Nach Bertschmann u. a. (2013, S. 56f.) wird der Abschlag für Kurzstrecken außerhalb von geschäftlichen Reisen nicht wahrgenommen. Daher wird der Zeitwert für Pendler im schienengebundenen ÖPNV über eher längere Distanzen[67] verwendet, den Bickel u. a. (2006, Tab. 0.7) mit 9,29 EUR pro Fahrgast und Stunde beziffern.

Den Umsteigewiderstand beziffert Bertard (2013, S. 62) nach Loug (1998) pauschal mit 18 Minuten. Schäfer (2016, S. 94) nennt ein Reisezeitäquivalent *„von zehn Minuten für wohnort- oder zielnahe Umsteigevorgänge im städtischen Berufsverkehr“*. Damit liegen für den Betrachtungsraum von Stadtschnellbahnsystemen, die sowohl zu städtischen Nahverkehrsrelationen als auch Bahnreiseverkehr zu zählen sind, Widerstandswerte in einer großen Spannweite vor. Die Unterschiede sind beachtlich, da die durchschnittlichen Reisezeiten im Agglomerations-

[63] Bei der von Bertard (2013, S. 67) genannten Gesamtreisezeit von 5,3 Stunden von Lille nach Bordeaux hätte demnach eine zusätzliche einstündige Wartezeit beim Umsteigen in etwa die gleiche anteilige Minderung des Attraktivitätsindexes zur Folge wie eine zusätzliche Wartezeit von sechs Minuten bei einer 30 minütigen Reise im Nahverkehr.

[64] Durch Auslassen eines Haltes durch die direkte Fahrt zum Ziel kann die schnellste Verbindung den Fahrgast zunächst eine Station entgegen seiner eigentlichen Richtung führen, damit er dort in den Expresszug in die eigentliche Richtung steigen kann. Sofern dabei eine Tarifgrenze überschritten wird, kann dies tarifliche Auswirkungen haben und die Fahrt teurer machen. Ein Beispiel im Großraum Berlin ist die Verbindung von Rahnsdorf nach Berlin: Die direkte Fahrt in der S-Bahn liegt ausschließlich im Tarifbereich Berlin AB. Fährt man hingegen ab Berlin-Rahnsdorf zunächst in stadtauswärtiger Richtung nach Erkner, um ab dort den schnelleren RegionalExpress in das Stadtzentrum zu nutzen, benötigt man einen Fahrausweis für den Tarifbereich Berlin ABC, da die Tarifgrenze zwischen Berlin-Rahnsdorf und Erkner liegt.

[65] Ein Beispiel sind Schnellbusse in Hamburg, in denen ein Expresszuschlag erhoben wird.

[66] Erst die oberhalb der S-Bahnen und Regionalverkehrszüge verkehrenden Fernverkehrszüge haben in den meisten Fällen andere - zum Teil inkompatible - Tarifsysteme.

[67] Die Studie nennt einen Wert von 7,23 EUR für Pendler auf kurzen Distanzen.

verkehr bei etwa 30 Minuten liegen,[68] so dass es sinnvoller erscheint, den von Bunge (2011, S. 76f.) eingeführten Indikator zum *Anteil der Umsteigezeit an der Reisezeit* zu verwenden. Um diesen in die Summe des Fahrwiderstandes (Formel 3.2.14) nach Bertard zu integrieren, muss eine zeitliche Dimension erreicht werden. Dazu wird das genannte Verhältnis mit dem Median der Wartezeiten beim Umsteigen auf der Verbindung multipliziert.[69] Folglich werden aus Umsteigevorgängen resultierende Wartezeiten in der Berechnung des Fahrwiderstandes zweimal verwendet und haben entsprechend negativen Einfluss.[70] Die negative Bewertung von Wartezeiten beim Umstieg ist jedoch weniger stark als der Einfluss der Zahl der Umsteigevorgänge.[71] Die Anzahl der Umsteigevorgänge multipliziert mit dem Median der Wartezeit pro Umstieg auf einer Verbindung sorgt dafür, dass entsprechend der Vorbemerkung Verbindungen mit wenigen Umsteigevorgängen und einer einzelnen langen Wartezeit besser bewertet werden als Verbindungen mit vielen Umsteigevorgängen und kürzeren Wartezeiten.

$$UW = \frac{\sum t_U}{\sum t_R} \cdot \overline{WZ_i} \tag{3.2.15}$$

Es ergibt sich somit der in EUR ausgedrückte Fahrwiderstand aus Formel 3.2.14:

$$W_i = 9,29\,\mathrm{EUR}/Fahrgasth \cdot (FZ_i + WZ_i + U_i \cdot UW) \tag{3.2.16}$$

Den Ausführungen zur ungewichteten Reisezeit in Abschnitt 3.2.1.6 sowie zur Verfügbarkeit von Nachfragedaten in Abschnitt 3.2.1.1 folgend, wird der Fahrwiderstand an dieser Stelle ungewichtet über alle Relationen in Lastrichtung ermittelt.

3.2.1.6. Reisezeiten

Durch das Auslassen von Zwischenhalten können Reisezeitverkürzungen erzielt werden. Diese fallen in Abhängigkeit verschiedener Parameter unterschiedlich groß aus. Einflussfaktoren sind dabei vor allem die Stationsabstände[72] sowie die Geschwindigkeit, mit der Durchfahrten an ausgelassenen Stationen zulässig sind.

In einem Beitrag zur Stuttgarter S-Bahn stellten Bauer u. Eilers (1993, S. 313, Tab. 1) fest, dass die Überholung eines S-Bahn-Zuges durch einen *„höherrangigen Zug bereits zu erheblichen*

[68] Vgl. Verweis auf das quasi-konstante Reisezeitbudget in Abschnitt 2.1 auf Seite 9.
[69] Siehe Formel 3.2.15.
[70] In Abschnitt 3.2.1.6 wird detaillierter auf die Zeitbewertung von Wartezeiten beim Umstieg eingegangen.
[71] Vgl. Abschnitt 3.2.1.7 auf Seite 36.
[72] Bei sehr dicht aufeinanderfolgenden Stationen entstehen zum Teil erst durch das Auslassen von Stationen Halteabstände, die lang genug sind, um die Höchstgeschwindigkeit zu erreichen.

Attraktivitätsverlusten führen“ kann. In ihrem Beispiel reduzierte sich die Reisegeschwindigkeit der 50 km langen Linie aufgrund einer stehenden Überholung durch einen Fernverkehrszug um zehn Prozent. Relevanter jedoch erscheint die vom Fahrgast wahrgenommene Reisezeitverkürzung, die daher nachfolgend thematisiert wird.

Die Bedeutung der Reisezeit wird neben anderen Aspekten wie Sicherheit, Sozialprestige, Bequemlichkeit und Umsteigehäufigkeit[73] meist als das bedeutendste Kriterium der Fahrgäste bei der Verkehrsmittelwahl angesehen. (Klatt 1980, S. 120) Eine bei Walf (2008, S. 83) zitierte Marketingbroschüre der Berliner Verkehrsbetriebe nennt *„für 77% der Reisenden [im ÖPNV] . . . die Reisezeit [als] das kaufentscheidende Kriterium“*. Die ebenfalls von Walf (2008, S. 83) angeführte Studie von Fröhlich u. Vrtic (2006, Tab. 6) für den Großraum Zürich zeigt, dass die Reisezeit im ÖV einen ebenso großen Einfluss auf die Nachfrage hat wie der Fahrpreis. Weniger relevant sind demnach die Umsteigehäufigkeit sowie noch dahinter die Fahrtenhäufigkeit. Von Klatt (1980, S. 120) werden Ergebnisse empirischer Untersuchungen angeführt, die zeigen, dass die Nachfrage gegenüber Qualitätsveränderungen stark elastisch sei.

Reisende empfinden die Reisezeit mitunter anders, als diese objektiv messbar ist. Es gibt verschiedene Untersuchungen, die eine Diskrepanz zwischen der objektiv messbaren Reisezeit und der von den Reisenden wahrgenommenen, subjektiven Reisezeit belegen.[74] Diese ist von nicht unerheblicher Bedeutung im Rahmen der vom Reisenden bewusst oder unbewusst durchgeführten Betrachtung der Verkehrswiderstände bei der Wahl der Verkehrsmittel. Besonders negativ werden dabei vom Reisenden nicht beeinflussbare, passive Zeiten ohne Ortsveränderung bewertet. Fahrzeiten im Fahrzeug werden kürzer empfunden als Fußwege. Wartezeiten und Haltestellenaufenthaltszeiten im Fahrzeug sind negativer als die Fahrzeit zwischen Stationen.[75] Weidmann (2013a, S. 66) und Schäfer (2016, S. 92f.) nennen einen Gewichtungsfaktor von 1,3 für Wartezeiten an Ausgangs- und Umsteigehaltestelle gegenüber dem realen Zeitwert.[76]

Siegmann u. Grosse (2002) stellen dazu fest, dass *„die nicht dem eigentlichen Transport dienenden Zeit-Komponenten im Vergleich zur Beförderungszeit sehr viel unangenehmer für den Nutzer“* sind als die Zeiten, in denen das Fahrzeug in Bewegung ist. Dies bestätigt auch die Aussage von Altmann u. a. (2004, S. 77), die zu der Erkenntnis kommen, *„dass die Fahrgäste*

[73] Vgl. Abschnitt 3.2.1.7 zur Bedeutung von Umsteigezwängen.

[74] Ein Beispiel siehe Ahlbrecht u. a. (1997, S. 227, Bild 1). Vgl. auch Abbildung 3.2.2 auf Seite 33.

[75] Vgl. u. a. Ahlbrecht u. a. (1997, S. 224).

[76] Heinze (2004, Kap. 1.1, S. 2) formuliert es etwas anders. Er schreibt, der Nutzen des Raumüberwindungsvorgangs *„kann höher sein als der damit verbundene zusätzliche Aufwand (wie Zeitverlust, Stress oder Unfallrisiko). Dies sind Möglichkeiten, die subjektiv wahrgenommen und als individuelle Nutzen auch nicht auf die monetäre Sphäre beschränkt bleiben, sondern ‚emotionelle Gewinne‘ enthalten. Ökonomisch ist also jedes Gut am Ankunftsort ein anderes als am Ausgangsort. Auch ist die reine Ortsveränderung von A nach B nicht alles. Solch eine erweiterte Sicht korrigiert jene verkehrsplanerische Zwangsvorstellung vom Verkehrsteilnehmer, der unablässig nur nach Reisezeitgewinnen jagt.“*

längere Haltestellenaufenthaltszeiten, während derer nichts geschieht, als ärgerlich empfinden, etwas langsameres Fahren auf einer ansonsten mit höherer Geschwindigkeit befahrenen Strecke (...) gar nicht so recht wahrnehmen.“ Ähnliches beschreiben auch Canis u. Koch (2003, S. 38) in ihrer Arbeit zum *„Erlebnis Bahnreise“*.

Walther u. a. (1997, S. 15) kommen zu dem Ergebnis, dass diese subjektiven Bewertungen im menschlichen Empfinden durch e-Funktionen beschrieben werden können. Entsprechend kann eine einzelne Zeitkomponente, insbesondere eine solche aus dem Bereich der nicht direkt der Fortbewegung dienenden Wartezeiten, den Gesamtwiderstand erheblich steigern. (Siegmann u. Grosse 2002, S. 566)

Holley u. a. (2007, S. 112) zeigen die unterschiedlichen Beschäftigungen von Reisenden in Abhängigkeit der Fahrzeit. Aktive Tätigkeiten wie Lesen und Arbeiten treten bei längeren Fahrzeiten häufiger auf als bei kurzen Fahrten.

Die auf Basis von Socialdata (1993, S. 14) erstellte Abbildung 3.2.2 zeigt die unterschiedliche Wahrnehmung der Zeitanteile im direkten Vergleich mit dem Motorisierter Individualverkehr (MIV). Basis des dort abgedruckten Diagramms sind in einer Studie in mehreren deutschen Ballungsräumen ermittelte Einschätzungen von ÖPNV-Nutzern und -Nicht-Nutzern, die den realen Werten gegenüber gestellt wurden. Referenz für eine ÖPNV-Fahrt waren 32 Minuten reale Reisezeit, die MIV-Fahrt dauerte im Schnitt 20 Minuten.[77] Im Ergebnis kommt die genannte Studie zu der Feststellung, dass die ohnehin kürzere Fahrt mit dem Auto um ein Fünftel unterschätzt und im ÖPNV insbesondere die Restzeit deutlich stärker überschätzt werde. Die Autoren dieser Studie stellen fest, dass es nicht zwingend immer sogenannter *„hard policies“* in Form von Angebotsverbesserungen bedarf, sondern die *„soft policies“* von ebenso großer Bedeutung für die Generierung von Nachfragesteigerungen seien. (Socialdata 1993, S. 4)

Diese Wahrnehmung lässt sich auch psychologisch begründen: Der Mensch teilt seine Aufmerksamkeit in zusammenhängende Abschnitte, nach Miller (1956) sogenannte *chunks*. Trefflich (2010, S. 18) führt drei Schritte der Aufmerksamkeit auf: *„Die Informationsaufnahme über die Sinneskanäle, [...] die Informationsverarbeitung und [...] die Informationsumsetzung in Form einer Reaktion oder Aktion“*. Bezogen auf eine Fahrt im ÖPNV bedeutet dies, dass bei jedem Brems- und Anfahrvorgang die Aufmerksamkeit des Reisenden geweckt wird, indem er prüft, ob er aussteigen muss. Somit beginnt ein neuer Aufmerksamkeitsabschnitt,

[77] Im ÖPNV entfielen im Schnitt je 50 Prozent auf Fortbewegungs- und Wartezeiten. Im motorisierten Individualverkehr MIV entfielen im Schnitt 20 Prozent auf die Wartezeiten und 80 Prozent auf die Fortbewegungszeit.

wohingegen bei einem (wenn auch mit langsamerer Geschwindigkeit) durchfahrenden Fahrzeug ein großer *chunk* entsteht und die Reise als kürzer empfunden wird.[78] Bihn u. a. (2000, S. 21f.) schreiben in diesem Zusammenhang sehr treffend, dass der Fahrgast im ÖPNV stets zwischen inneren Prozessen (Abschalten, Tagträumen) und äußeren Prozessen (Festhalten, aufmerksam die Umgebung beobachten) *„hin und her-switchen [muss und] bei allen Träumereien oder Gefesseltsein durch die Lektüre die Haltestelle für den Ausstieg nicht verpassen“* darf.

In diesem Zusammenhang ist die von Grunberg (2003, S. 42f.) gemachte Erkenntnis erwähnenswert, dass die Bewertung einer Reisezeitveränderung absoluten und nicht relativen Maßstäben unterliegt. Wiegelmann (2005, S. 39) folgert daraus entsprechend, dass ein Reisender eine Verkürzung der Reisedauer um eine Zeiteinheit unabhängig von seiner Gesamtreisezeit beurteilt. Auch Bertard (2013, S. 40ff.) misst der *„gefühlten Fahrzeit“* eine wichtige Bedeutung in der Gesamtattraktivität eines Verkehrsangebotes zu.

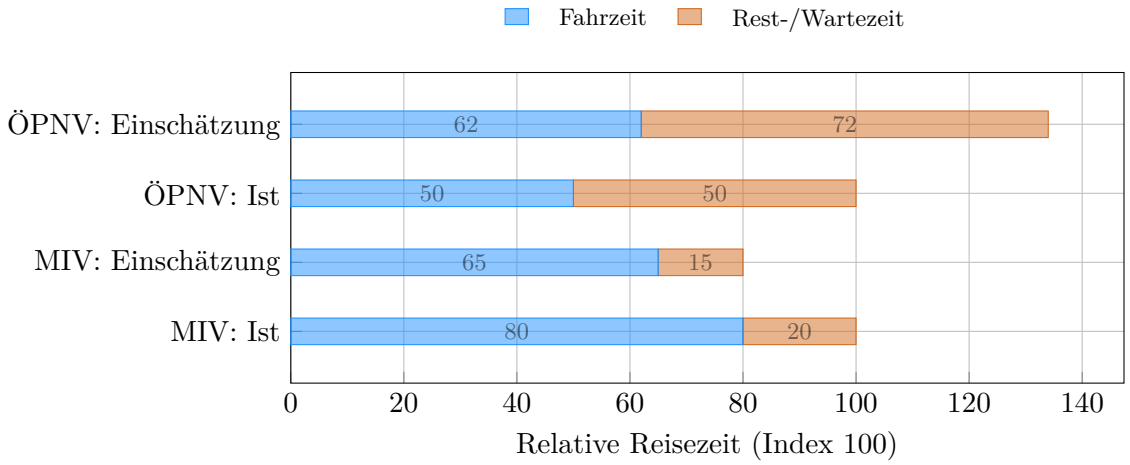

Abbildung 3.2.2: Subjektive Einschätzung der Reisezeit für ÖPNV und MIV [eigene Darstellung auf Basis von Socialdata (1993)].

Ein Beispiel für diese subjektive Wahrnehmung sind die in Abschnitt 329 detaillierter beschriebenen Expressfahrten zwischen dem Pariser Flughafen Roissy - Charles-de-Gaulle und der Innenstadt, die gegenüber den überall haltenden Zügen lediglich eine Fahrzeitreduktion von 14 Prozent[79] bringen. Reisende von und zum Flughafen haben mit den jeweils alle Viertelstunde verkehrenden Zügen somit acht Fahrtmöglichkeiten pro Richtung und Stunde, nutzen jedoch primär die Expresszüge (o.A. 2003b, S. 4), die durch neun ausgelassene Halte eine

[78] Vgl. Kottenhoff u. Sundström (2011, S. 21ff.) zum Zusammenhang zwischen Beschleunigungen und wahrgenommenem Komfort.

[79] Die Fahrzeit beträgt 30 Minuten anstelle von 35 Minuten zwischen dem Endbahnhof am Flughafen und dem Gare du Nord.

deutlich kürzere Fahrzeit erwarten lassen. Die subjektiv wahrgenommene Differenz zwischen den Reisezeiten ist deutlich größer als die tatsächliche Differenz.[80]

Eine Steigerung der Attraktivität eines Verkehrsangebotes in der subjektiven Wahrnehmung der Reisenden kann also schon dadurch gesteigert werden, dass das Verhältnis zwischen den Wartezeiten und den Zeiten, in denen das Fahrzeug in Bewegung ist, zugunsten der Bewegungszeit verändert wird. Reisezeitverkürzungen durch eine Erhöhung der absoluten Streckengeschwindigkeit durch kostenaufwändige infrastrukturelle Maßnahmen sind besonders im Nah- und Regionalverkehr mit vergleichsweise kurzen Gesamtreisezeiten von geringerem Nutzen als die Verkürzung der Aufenthaltszeiten oder das Auslassen von Zwischenhalten. Aufgrund der geringen Gesamtreisezeiten führt die Senkung des Anteil der Fortbewegungszeit zu einer Steigerung des Anteil der Wartezeiten an der Gesamtreisezeit und erhöht in der subjektiven Wahrnehmung den Verkehrswiderstand, sofern dieser nicht in nennenswertem Umfang durch die objektive Verkürzung der Gesamtreisezeit reduziert wird.

Abschnittsweise Expressfahrten oder alternierende Bedienung von Zwischenhalten verändern entsprechend das Verhältnis zwischen Warte- und Fortbewegungszeiten. Der Reisezeitgewinn ist somit nicht das einzige Mittel für eine gefühlte Beschleunigung.

Durch differenzierte Halteregime wird in der Regel für Fahrgäste, für die sich keine zusätzlichen Umsteigezwänge ergeben, eine Reisezeitverkürzung erreicht. Diese lässt sich als absoluter Wert in eingesparten Minuten Reisezeit pro Streckenabschnitt ausdrücken. Um eine Vergleichbarkeit zu schaffen und diese Reisezeitersparnis entsprechend der Gesamtreisezeit zu gewichten, ist jedoch auch die relative Reisezeitverkürzung relevant. Bei sehr kurzen Reisezeiten haben naturgemäß bereits kleine Reisezeitverkürzungen nennenswerte Auswirkungen auf die relative Verkürzung, bei längeren Gesamtreisezeiten sind Einsparungen im Bereich von wenigen Minuten jedoch eher unerheblich.

In den Systemen werden sowohl die relative als auch die absolute Einsparung pro Betrachtungsabschnitt als Parameter $\Delta T_{R,rel}$ bzw. $\Delta T_{R,abs}$ erfasst. Als Nebenprodukt wird an dieser Stelle auch die *Reisezeiteinsparung pro ausgelassenem Halt* (t_{aH}) erfasst.[81]

Ein weiterer Aspekt zur Beschreibung eines Netzes ist die von Brühwiler u. a. (2015, S. 286f.) für die Bewertung des Zürcher S-Bahn-Netzes eingeführte ungewichtete mittlere Reisezeit. Diese bestimmt sich als durchschnittliche Reisezeit aus Fahrzeit und Umsteigezeit zwischen allen

[80] Mangels verfügbarer Studien basiert diese Aussage auf zahlreichen Befragungen des Autors im Familien- und Bekanntenkreis im Anschluss an Flugreisen nach Paris. Dabei wurde stets gefragt, wie groß der Reisezeitunterschied zwischen den beiden Angebotsprodukten auf dieser Strecke sei. Die genannten Werte lagen jeweils deutlich über den tatsächlichen fünf Minuten. Deren Nennung sorgte stets für Erstaunen.

[81] Weitere erfasste Aspekte zu Expressfahrten siehe Abschnitt 3.2.2.6 auf Seite 42.

Stationen des Netzes. Ohne Beachtung von Fahrgastzahlen enthält dieser Mittelwert zwar mit gleicher Wertigkeit Relationen, die kaum oder sehr stark nachgefragt werden, liefert jedoch im genannten Artikel eine Vergleichsbasis für unterschiedliche Szenarien. Der Systematik der anderen Vergleichsparameter folgend ist in der vorliegenden Arbeit anstelle der mittleren Reisezeit der *Median der Reisezeiten* von allen Stationen zu allen erreichbaren Stationen ($\overline{t_{R,g}}$) relevant.[82] Er zeigt, wo in den einzelnen Netzen der Schwerpunkt der Reisezeiten liegt und drückt damit im Vergleich aus, ob ein Netz eher längere oder kürzere Reisezeiten zwischen den einzelnen Stationen aufweist. Zur Berechnung der Verbindungen wird auf den Algorithmus und die Datenstruktur von Friedrich (2017, S. 46ff.) zurückgegriffen. Dabei wird die Bewertung der Verbindungsqualität entsprechend der Formel 3.2.16 in Abschnitt 3.2.1.5 angepasst. Da die Fahrplandaten betriebsstellenscharf erfasst wurden,[83] werden aus Fahrgastsicht zusammengehörende Stationen sie für die Verbindungssuche zusammengefasst zu Stationsbereichen.

Ermittelt wird für jedes Netz jeweils auch der *Median der kürzesten Reisezeiten* ($\overline{t_{R,k}}$) zwischen zwei Stationen der Vorlage von Brühwiler u. a. folgend ohne Beachtung der Häufigkeit dieser Verbindung. Stellt man $\overline{t_{R,k}}$ und $\overline{t_{R,g}}$ gegenüber, zeigt ein abweichender Wert der kürzesten Reisezeiten, dass es Verbindungen mit unterschiedlich attraktiven Angeboten gibt, beispielsweise durch parallel existierende Direktverbindungen und Umsteigeverbindungen bzw. Expresszüge und an allen Stationen haltende Züge. Ist der Median der kürzesten Reisezeiten, der auf jeder Relation nur die beste Verbindung berücksichtigt, größer als jener über alle Verbindungen, gibt es in dem betreffenden Netz auf den eher kurzen bzw. schnellen Verbindungen ein größeres Angebot als auf den eher langen bzw. langsamen Verbindungen.[84]

Eine Reduktion der Reisezeit durch das Auslassen von Zwischenhalten ist jedoch nicht nur eine verkehrliche Maßnahme, da dadurch auch die Einsatzzeit des Zugpersonals reduziert wird. (Flemming 1977, S. 331) Somit handelt es sich auch um eine betriebliche Maßnahme mit wirtschaftlichen Auswirkungen.[85]

[82] Im Gegensatz zu den anderen Vergleichsparametern finden hier auch Fahrten entgegen der Lastrichtung Beachtung, da es Relationen geben kann, die nur durch Nutzung der Gegenrichtung sinnvoll erfüllt sind.

[83] Ein Beispiel: Die Station Berlin Westkreuz besteht aus den Betriebsstellen BWKRR (Ringbahn) und BKWS (Stadtbahn).

[84] Beispiel: In einem Netz gibt es eine sehr lange Linie mit vielen Zwischenhalten, die weit in das Umland führt und nur im Stundentakt bedient wird sowie eine kurze Linie, auf der ein Angebot im 10-Minuten-Takt besteht. Im Median der kürzesten Verbindungen ergibt sich in diesem Fall ein höherer Wert als bei Betrachtung aller Verbindungen, bei der die quantitativ überlegenen kurzen Verbindungen die wenigen Fahrten der langen Linie dominieren.

[85] Vgl. dazu Abschnitt 3.2.3.5.

Zur Vergleichbarkeit auch über diese Arbeit hinaus wird noch ein weiterer Wert bestimmt, da dieser zu den klassischen Vergleichsparametern unterschiedlicher Netze gezählt werden kann: die Reisegeschwindigkeit (v_R) in Lastrichtung als Quotient aus Fahrtlänge und Fahrtdauer.[86]

$$v_R = \frac{l_{Fahrt,L}}{t_{Fahrt,L}} \tag{3.2.17}$$

Um die Reisegeschwindigkeit einordnen zu können, wird die *Distanz zwischen zwei Halten* (l_H) sowohl über alle Fahrten als Median, als auch als Mittelwert jeder Fahrt ($\overline{l_H}$) erhoben.[87]

3.2.1.7. Bedeutung von Umsteigezwängen

Die zuvor dargestellte[88] besonders negative Wahrnehmung von nicht der Fortbewegung dienenden Zeiten erfordert eine besondere Betrachtung sich durch alternative Bedienungskonzepte ergebender zusätzlicher Umsteigevorgänge.

Hier ist besondere Aufmerksamkeit erforderlich, um die Vorteile eines alternativen Konzeptes gegenüber der negativen Bewertung gegebenenfalls erforderlicher Umstiege auf bestimmten Relationen hervorzuheben.

Die Bewertung der Zuverlässigkeit von Umstiegen obliegt nach Schnee (2009, S. 58) bislang dem Reisenden, da vorhandene Fahrplanauskunftssysteme zwar die Anzahl, ggf. auch die Wartezeiten, jedoch nicht die Zuverlässigkeit der Anschlüsse bewerten. Schnee zeigt zur Untermauerung der Relevanz beispielhaft zwei Verbindungen mit je zwei Umstiegen auf: Während die erste Verbindung Umsteigezeiten von zweimal fünf Minuten hat, muss der Reisende im zweiten Fall je einmal neun und eine Minute warten. Wenngleich beide Verbindungen in Summe die gleiche Anzahl an Umstiegen und Umsteigewartezeiten haben, erscheint dem Fahrgast die erste Verbindung zuverlässiger, da geringe Verspätungen nicht in jedem Fall zum Anschlussverlust führen. Auch aus Sicht der Verkehrsunternehmen ist die Sicherheit von Anschlussbeziehungen von Bedeutung, da ein regelmäßiger Anschlussverlust bei den Fahrgästen schnell zu Imageschaden, Nachfragerückgang und in der Folge zu Einnahmeverlusten führen kann. (Altmann u. a. 2004, S. 27)

[86] Vgl. zu Fahrtlänge und Fahrtdauer auch Abschnitte 3.2.2.10 und 3.2.3.5.

[87] Dieser Wert zeigt im Grunde die Länge (als Entfernung) der oben den psychologischen Untersuchungen entnommenen *Aufmerksamkeitsabschnitte*.

[88] Vgl. Kapitel 3.2.1.6 auf Seite 30.

Einen Zusammenhang zwischen Taktdichte, Umsteigezwang und Reisezeit hat Dziekan (2008b, S. 527f.) am Beispiel einer Verbindung in der Stockholmer Innenstadt gezeigt. Hier bevorzugte ein Großteil der Befragten den alle fünf Minuten verkehrenden direkten Bus mit einer Fahrzeit von zwölf Minuten[89] gegenüber der alle drei Minuten verkehrenden U-Bahn mit derselben Reisezeit[90] und einem Umstieg. Zu ähnlichen Erkenntnissen kommen Fröhlich u. Vrtic (2006, Tab. 6), die bei einer Betrachtung der Nachfrageelastizität feststellen, dass die Anzahl der Umstiege eine größere Bedeutung hat als die Fahrtenhäufigkeit. Im Unterschied zu Dziekan messen Fröhlich u. Vrtic jedoch der Fahrzeit eine doppelt so hohe Relevanz zu als der Anzahl der Umstiege. Eine kürzere Fahrzeit wäre entsprechend attraktiver als eine geringe Anzahl an Umstiegen. Altmann u. a. (2004, S. 34) bestätigen, dass vermehrtes Umsteigen, *„nicht unbedingt zurückgehende Fahrgastzahlen bedeuten muss“*. Nach Walf (2008, S. 100) liegt es an der Präferenz des Fahrgastes, ob *„der zusätzliche Umsteigevorgang stärker negativ bewertet wird als die [daraus resultierende] Reisezeitverkürzung positiv“*. Konkret auf Berlin bezogen haben Krafft-Neuhäuser u. Reinhold (2005, S. 34) festgestellt, dass ein dichteres Verkehrsangebot auf stark frequentierten Korridoren (unter Inkaufnahme zusätzlicher Umsteigezwänge mit kurzen Wartezeiten) positivere Effekte hat als eine größere Haltestellendichte mit jeweils dünnerem Verkehrsangebot und geringeren Umsteigezeiten.

Weidmann (2013a, S. 67) zitiert eine Studie von Intraplan, nach der sich der *„Marktanteil des ÖV in Abhängigkeit von der Umsteigehäufigkeit bei sonst guter Angebotsqualität in zentrumsbezogenen Verkehrsbeziehungen“* schon durch einen Umstieg halbiere. Oetting (2003, S. 616) zeigt, dass der Nutzungswiderstand und somit die Attraktivität eines öffentlichen Verkehrsangebotes sowohl bei einer Reduktion der Fahrzeugfolgezeit als auch bei kürzeren Beförderungszeiten steigt. Hervorzuheben ist, dass ein doppelt so dichter Takt positiveren Einfluss auf den Widerstand hat als eine halbierte Reisezeit. Daraus lässt sich ableiten, dass Reisende durchaus zusätzliche Umsteigezwänge in Kauf nehmen, die in der Regel durch eine Umsteigepönale in Form eines pauschalen Aufschlags auf die Reisezeit in Bewertungen berücksichtigt werden,[91] wenn dadurch ein dichteres Verkehrsangebot mit mehr Fahrtmöglichkeiten entsteht. Abschnittsweise Expressfahrten könnten daher einerseits die Attraktivität erhöhen, da sie mindestens die wahrgenommene Reisezeit reduzieren und andererseits durch zusätzliche Umsteigezwänge und resultierende Umsteigepönale die Attraktivität reduzieren.

Bei Umsteigerelationen ist nicht unerheblich, welche Nutzergruppe primär betroffen ist. Berufspendler auf dem Weg zur Arbeit und Geschäftsreisende haben andere Prioritäten als ältere

[89] Zuzüglich der Unzuverlässigkeiten des straßengebundenen ÖV.
[90] Die U-Bahn bietet zudem eine höhere Zuverlässigkeit als die Busverbindung durch Unabhängigkeit vom Straßenverkehr.
[91] Vgl. zu Umsteigekosten auch Friedrich (2017, S. 34).

Reisende oder Urlaubsreisende mit viel Gepäck.[92] Erstere Gruppe bevorzugt schnellere Verbindungen und ist meist in der Lage, Umsteigewege aufgrund von Erfahrung durch tägliche Nutzung zu optimieren und in vergleichsweise kurzer Zeit zurückzulegen.[93] Die zweite genannte Gruppe[94] ist auf Aufzüge oder Rampen angewiesen und benötigt so meist mehr Zeit zum Umsteigen. Weitgehend vernachlässigbar[95] sind die Unterschiede der Nutzergruppen bei bahnsteiggleichen oder gar bahnsteigkantengleichen Umsteigerelationen.[96] Bahnsteiggleich schaffen auch mobilitätseingeschränkte Nutzer sehr kurze Übergangszeiten, sofern der Aus- und Einstieg niveaugleich erfolgen kann.[97] Der Aufwand, aus dem ersten Fahrzeug auszusteigen und in das zweite Fahrzeug einzusteigen, bleibt jedoch in jedem Fall erhalten.

Zum Vergleich wird die *minimale Anzahl von Umstiegen* (N_U) bei den jeweils besten Verbindungen erfasst. Als solche wird jeweils zwischen zwei Stationen die Verbindung bezeichnet, die den geringsten Fahrwiderstand[98] aufweist.

3.2.1.8. Zwischenfazit: Verkehrliche Beschreibung

Die Beschreibung des Verkehrsangebotes erfolgt durch die Kriterien zur *Attraktivität* sowie die Betrachtung der *verkehrlichen Differenzierung*.[99]

Dabei werden zunächst das den Reisenden zugängliche Angebot und die im Fokus der Arbeit stehende Differenzierung, ausgedrückt durch das verfügbare Platzangebot und die effektiven Stationshalte, betrachtet. Die Regelmäßigkeit des Angebotes wird über die Verteilung von Platzangebot und Zugfahrten beschrieben. Der zweite Block beschreibt die Attraktivität des Angebotes. Hier stehen vor allem die Reisezeiten und Reisezeitgewinne und Umsteigezwänge im Fokus.

Die Breite der verkehrlichen Aspekte der zu beschreibenden Systeme wird damit, unter besonderer Beachtung der Differenzierung des Angebotes, abgedeckt.

---

92 Eine noch feinere Unterteilung führt Friedrich (2017, S. 26ff.) ein.

93 Ein Beispiel ist das die Umsteigewege minimierende Einsteigen in das Fahrzeug, um am Umsteigebahnhof direkt an der Treppe auszusteigen.

94 Mobilitätseingeschränkte Reisende findet man auch unter Berufspendlern.

95 Reisende mit viel Gepäck werden hier nicht betrachtet, da sie abgesehen von Flughafenverkehren in verdichteten Verkehren kaum Relevanz haben.

96 *„Die Schnellbahnknoten müssen so gestaltet werden, daß die Mehrzahl der Umsteiger den Zugwechsel am gleichen Bahnsteig vornehmen kann.“* (Grassmann 1964b, S. 684)

97 Zu den Bedürfnissen mobilitätseingeschränkter Reisender sowie der Anforderungen an Barrierefreiheit sei beispielhaft auf Dziekan u. Ruhrort (2010) verwiesen.

98 Vgl. Definition in Gleichung 3.2.16 auf Seite 30.

99 Vgl. Aufschlüsselung in Tabelle 3.2.1.

Tabelle 3.2.1: Verkehrliche Vergleichskriterien für die einzelnen vorgestellten Systeme.

Gruppe	Name	Bezeichnung
Attraktivität	Fahrwiderstand [EUR/Platz-h]	L_i
	Halteabstand [km]	l_H
	Mittlerer Halteabstand pro Fahrt [km]	$\overline{l_H}$
	Median der kürzesten Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,k}}$
	Median der Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,g}}$
	Reisezeitgewinn (absolut) [Min.]	$\Delta T_{R,abs}$
	Reisezeitgewinn (relativ, pro Abschnitt) [%]	$\Delta T_{R,rel}$
	Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt [Min.]	t_{aH}
	Reisegeschwindigkeit pro Fahrt [km/h]	v_R
	Umsteigezwänge	N_U
Verkehrliche Differenzierung	Quotient der Zugstärkenänderung	η_{ZG}
	Quotient Platzangebot	η_P
	Quotient Stationshalte	η_S
	Quotient der Verkehrsangebotsleistung	η_V
	Varianz des Deltas des Platzangebotes [%]	$\nu_{\Delta P}$
	Varianz der Abfahrten [%]	ν_Z
	Varianz des Platzangebotes [%]	ν_P
	Verkehrsangebotsleistung pro Strecke [10^3 Platzkm]	P_V

3.2.2. Betriebliche Beschreibung

Neben den zuvor beschriebenen verkehrlichen Aspekten werden Systeme auch durch verschiedene betriebliche Aspekte charakterisiert. Diese können Randbedingungen darstellen, die als Folge der Verkehrsbedürfnisse (z. B. die Verteilung von (Zwischen-)Endstellen) oder in Form der Infrastrukturausstattung die Komplexität des Systems erhöhen. Weitere Auswirkung auf die Betriebsqualität haben die Länge von Fahrten sowie die zeitliche Ausdehnung der HVZ.

3.2.2.1. Endstellen und Zwischenendstellen

Die Anzahl an geplant genutzten sowie dispositiv nutzbaren Zwischenendstellen auf den einzelnen Strecken entscheidet über die Stabilität der Betriebsführung. Systeme mit planerisch uniformen Linienverläufen[100] weisen eine geringere Komplexität auf als Systeme mit mehreren Zwischenendstellen, wie es im Vorortverkehr oftmals anzutreffen ist. Dispositiv sieht es anders aus: Hier kann durch eine größere Zahl möglicher Wende- und Abstellmöglichkeiten entlang einer Strecke im Störungsfall auch eine zügigere Störungsbeseitigung möglich sein. Der Fokus

[100] Dies ist beispielsweise in den meisten U-Bahn-Systemen der Regelfall.

der Arbeit liegt jedoch in der Planung, so dass als Vergleichsparameter das Verhältnis der planmäßig genutzten Zwischenendstellen zu allen planmäßig genutzten Endbahnhöfen ausgehend vom zentralen Bereich erfasst und als η_{ZE} bezeichnet wird. In einem System, auf dem alle Fahrten bis zu den Außenbahnhöfen des Netzes verkehren, ist dieser Wert entsprechend 0. Berücksichtigt werden hier nur in der HVZ regulär und wiederholt genutzte Zwischenendstellen. Von einzelnen Ein- oder Aussetzfahrten zu Beginn oder zum Ende der HVZ genutzte Endstationen fallen aus der Betrachtung. Gezählt werden nur Endbahnhöfe, an denen Fahrten in Lastrichtung beginnen. Die absolute *Zahl der Endstellen* (N_E) wird ebenfalls erfasst. Als weiterer Parameter wird der *Anteil der Endstellen an der Gesamtzahl der Stationen* ermittelt (η_E). Damit ist erkennbar, ob es sich um ein Netz mit wenigen Endstellen und vielen Stationen entlang der Strecke oder ein eher homogenes Netz mit gleichlangen Ästen und eher vielen Endstellen handelt.

3.2.2.2. Anzahl der Gleise pro Strecke

Der Umfang der vorhandenen und für den Betrieb nutzbaren Infrastruktur ist eine wichtige Grundlage bei der Angebotsplanung. So können unterschiedliche Strom- oder Zugsicherungssysteme sowie fehlende Bahnsteige bei vier parallel verlaufenden Gleisen nur zwei für den Stadtschnellbahnbetrieb nutzbar machen. Andere Beispiele sind Netze, wo in historisch gewachsenen und mittlerweile sehr stark nachgefragten Korridoren nur zwei Gleise existieren, wodurch fliegende Überholungen infrastrukturell nicht möglich und ein Ausbau in dicht besiedelten Gebieten nur schwer oder gar nicht möglich ist. Ebenso gibt es in vielen Netzen eingleisige Abschnitte, die je nach Ausdehnung und Lage die Planung und Betriebsdurchführung mehr oder weniger maßgeblich beeinflussen.

Die *Anzahl der Gleise einer Strecke*[101] (N_G) zählt alle für den Betrieb des betrachteten Systems nutzbaren Gleise - unabhängig von der Fahrtrichtung.

3.2.2.3. Höchstgeschwindigkeit

Um Zusammenhänge zwischen der Reisezeit[102] und den Distanzen sehen zu können, ist auch die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf einem Abschnitt von Interesse. Vereinfachend wird dabei jeweils die zwischen zwei Stationen *zulässige Höchstgeschwindigkeit* (v_{max}) erfasst. Geschwindigkeitseinbrüche werden vernachlässigt, da dieser Wert primär der überschlägigen Berechnung

[101] Der Begriff der *Strecke* umfasst hier abweichend von der Definition in Deutschland alle zwischen zwei Stationen parallel verlaufenden Gleise.
[102] Siehe im Abschnitt 3.2.1.6.

des Energiebedarfs zum Beschleunigen nach einem Stationshalt dient. In Systemen, in denen sämtliche Fahrzeuge eine niedrigere Höchstgeschwindigkeit haben als die Infrastruktur, wird diese erfasst.

3.2.2.4. Fahrten entgegen der Lastrichtung

In Systemen mit einer ausgeprägten Lastrichtung und einem verdichteten Verkehrsangebot über eine längere Zeit stehen die EVU vor der Wahl, die Fahrten in entgegengesetzter Richtung als Leerfahrten durchzuführen, um die Umlaufzeit der Verdichtungszüge zu verkürzen. Dazu stellte Juhnke (1966c, S. 201) fest: *„Charakteristisch sind weiterhin während der Berufsstunden Leerfahrten in eine und ausgesprochene Lastfahrten in die andere Richtung. Viele Halte der Nah- und Bezirkszüge führen zu einem langsamen Umlauf des rollenden Materials und zu einer schlechten Ausnutzung des fahrenden Personals.“* Ein anderes betriebliches Mittel ist die Führung dieser Rückfahrten als Fahrgastfahrten, die nur ausgewählte Halte bedienen und so einerseits einen verkehrlichen Nutzen haben und dennoch die Umlaufzeit etwas verkürzen. Die dritte Möglichkeit ist eine Rückführung als normale Fahrgastfahrten. Dabei ist jedoch oftmals problematisch, dass die angebotenen Kapazitäten zu einem großen Teil ungenutzt sind und somit Leerkosten entstehen.[103] Diese Möglichkeit ist jedoch sinnvoll in Systemen ohne ausgeprägte Lastrichtung. Zuletzt bietet sich die Möglichkeit an, Fahrzeuge am Zielort abzustellen und dort auf die Rückfahrt in der folgenden Spitzenzeit zu warten. Dies ist bei Systemen mit sehr großen Linienlängen denkbar, bei kleineren Systemen aufgrund des erhöhten Fahrzeugbedarfs jedoch eher nicht zu erwarten.

Zur Vergleichbarkeit wird der Quotient $\eta_{F,G}$ eingeführt, der das Verhältnis zwischen der Anzahl der Fahrten entgegen der Lastrichtung (G) zu der Zahl der Fahrten in Lastrichtung (L) auf einem Querschnitt pro Stunde in der HVZ ausdrückt:

$$\eta_{F,G}(a) = \begin{cases} \frac{\sum^{i}(n_{Fahrten\ G\ i})}{\sum^{j}(n_{Fahrten\ L\ j})} & , \text{ mit Angebot in Gegenrichtung} \\ 0 & , \text{ ohne Angebot in Gegenrichtung} \end{cases} \tag{3.2.18}$$

Bei gleichem Verkehrsangebot in beide Richtung ergibt sich der Quotient zu 1. Gibt es entgegen der Lastrichtung kein Angebot, ergibt sich der Quotient zu 0. Bei der (zu erwartenden) Dominanz der Lastrichtung ergeben sich folglich Werte kleiner 1.

[103] Vgl. Juhnke (1966c, S. 203).

3.2.2.5. Anzahl der Zugfahrten

Da die Kosten einer Zugfahrt[104] zu einem großen Teil unabhängig von der Zuglänge sind, ist auch das Verhältnis der Zugzahlen im Grundangebot und in der HVZ relevant. So kann durch den Einsatz weniger sehr langer Verstärkerzüge im zuvor definierten Quotient des Platzangebotes[105] derselbe Effekt erzielt werden wie durch den Einsatz mehrerer kurzer Verstärkerzüge. In der Bilanz der erbrachten Betriebsleistung unterscheiden sich beide Varianten aber deutlich, da die Zahl der Zugkilometer bei mehr Fahrten höher ist.[106]

Es wird daher ein weiterer Quotient η_F eingeführt, der das Verhältnis zwischen der Anzahl der Fahrten a in der HVZ (H) zu der Zahl der Fahrten in der NVZ (N) auf einem Querschnitt pro Stunde ausdrückt:

$$\eta_F(a) = \begin{cases} \frac{\sum^{i}(n_{Fahrten\ H\ i})}{\sum^{j}(n_{Fahrten\ N\ j})} & , \text{ mit Angebot in der NVZ} \\ 0 & , \text{ ohne Angebot in der NVZ} \end{cases} \tag{3.2.19}$$

Bei gleichem Verkehrsangebot zu allen Zeiten ergibt sich naturgemäß auch dieser Quotient zu 1. Dies gilt auch für Netze, in denen lediglich zwischen dem Tagesverkehr und dem späten Abend Unterschiede festzustellen sind, da im Rahmen dieser Arbeit die Zeiten der sehr starken Nachfrage im Mittelpunkt stehen.

η_F liefert bei differenzierten Halteregimes keine Aussage zu bedienten und ausgelassenen Halten. Dies ergibt sich aus dem Quotient der Stationshalte.[107]

3.2.2.6. Ausprägung von Expressfahrten

In diesem Abschnitt werden zunächst einige Aspekte und Motivationen zur Durchführung Expressfahrten beschrieben, bevor im zweiten Teil die für die weitere Arbeit relevanten Beschreibungsparameter zu Expressfahrten erarbeitet werden.

[104] Vgl. Abschnitt 3.2.3 auf Seite 53.
[105] Siehe Abschnitt 3.2.1.1 auf Seite 19.
[106] Die Summe der Fahrzeugkilometer bleibt natürlich gleich, ist jedoch in diesem Zusammenhang weniger relevant als die Zugkilometer.
[107] Vgl. Abschnitt 3.2.1.2.

3.2.2.6.1. Aspekte von Expressfahrten

Spricht man von *Expressfahrten*, wird oftmals zusätzliche Infrastruktur impliziert, da nur mit dieser die allfälligen Überholungen der langsamen durch die schnelleren Züge möglich sei. Studien wie Zimmer (1971a, S. 3) basieren auf der Annahme, dass langsame Züge stets von schnelleren *stehend* überholt werden müssen. Entsprechend sei der Abstand der Überholbahnhöfe zu bemessen.

Die Entmischung von schnellen und langsamen Verkehren ist seit Jahrzehnten in der Diskussion.[108] Sie ist die wirksamste - aber auch kostspieligste - Lösungsmöglichkeit, da sie eine größtmögliche Harmonisierung der Verkehre und damit in der Regel die höchste Leistungsfähigkeit einer Strecke zur Folge hat.

Aufgrund infrastruktureller Restriktionen ist es oftmals nicht möglich, gänzlich auf für den langsameren Zug zeitraubende Überholungen zu verzichten. Bei günstiger Infrastruktur und einem darauf abgestimmten Fahrplangefüge, lassen sich jedoch trotz unterschiedlicher Reisegeschwindigkeiten und Haltekonzeptionen Überholungen weitgehend vermeiden, wie das Pariser RER-Netz zeigt.[109]

Zimmer (1960, S. 85) spricht von einem *„parallelen Fahrplan“*, der sich aus parallelen Zeit-Weg-Linien zusammensetzt, also Zügen mit gleicher Reisegeschwindigkeit. Dies ist einerseits bei Zügen mit gleicher Höchstgeschwindigkeit und gleichem Haltegefüge möglich. Andererseits können sich gleiche Reisezeiten auch durch alternierende Bedienung[110] ergeben.

Zimmer (1960, S. 86) stellt jedoch auch fest, dass unter bestimmten Voraussetzungen ein schneller Zug sehr gut in das Fahrplangefüge eines Grundnetzes mit parallelen Zügen einfügen lassen.[111]

Die Problematik von großen Geschwindigkeitsscheren wurde in einer Studie von Hörstel u. a. (1993b) betrachtet. Am Beispiel von an den InterCityExpress (ICE) angelehnten Güterzügen (ICE-G) mit bis zu 250 km/h zwischen Güterzügen im *normalen* Geschwindigkeitsbereich bis

[108] Vgl. u. a. Michelfelder (1953, S. 29), Zimmer (1971b, S. 82). Die Deutsche Bahn AG, bzw. ihre Vorgängerin die Deutsche Bundesbahn, hatte dieses Ziel in der Konzeption *Netz 21* festgeschrieben. Vgl. (o.A. 2003a, S. 23) Dieses Netz wurde bislang nur teilweise umgesetzt, so dass es eine Vielzahl von Strecken in Deutschland gibt, auf denen Züge im Mischbetrieb verkehren.

[109] Vgl. Abschnitt 4.6 auf Seite 146.

[110] Diese wird auch als *skip-stop service* bezeichnet. Vgl. Erläuterungen in diesem Abschnitt 3.2.2.6.2 auf Seite 46.

[111] In seinem Fall handelt es sich um Güterzüge mit einer Reisegeschwindigkeit von 72 km/h und einem Schnellzug mit 120 km/h. Der Schnellzug fügt sich bei einer um 10 Minuten kürzeren Fahrzeit auf 30 Kilometern Länge in das Grundnetz der Güterzüge ein.

120 km/h auf der Schnellfahrstrecke Hannover - Würzburg zeigte die Studie, dass die Gesamtzahl der Züge und damit die Leistungsfähigkeit der Strecke durch das Einlegen eines deutlich schnelleren Zuges in das sonst sehr homogene Fahrplangefüge die Betriebsstabilität und -qualität deutlich reduziert. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass nur in einer Variante mit *fliegenden Überholungen* sowie einer abschnittsweisen Reduktion der Höchstgeschwindigkeit des ICE-G eine gute Betriebsqualität zu erzielen sei.[112]

Frank u. a. (2012, S. 82f.) heben die Heterogenität des Verkehrs in Infrastrukturbereichen mit unterschiedlichen Verkehren, die *„sich in ihrer durchschnittlichen Geschwindigkeit unterscheiden“*. Diese Effekte ergeben sich auch innerhalb des Personenverkehrs, wo schneller Fernverkehr und Regionalverkehre mit Zwischenhalten auf denselben Strecken verkehren. Während im Güterverkehr die Züge in der Regel ohne Zwischenhalt verkehren und somit die Reisegeschwindigkeit maßgeblich durch die mögliche Höchstgeschwindigkeit beeinflusst wird, sind im Personenverkehr die Anzahl der Zwischenhalte, die Einfahrgeschwindigkeiten in Haltebahnhöfe sowie die Durchfahrgeschwindigkeit in nicht bedienten Stationen ebenso von Bedeutung.

Auf stark im Güter- und Fernverkehr belegten Mischverkehrsstrecken kann durch die abschnittsweise Expressführung von Regionalverkehrszügen eine zusätzliche Trasse gewonnen werden, die für einen überall haltenden Zug nicht vorhanden wäre.[113] Die höhere Reisegeschwindigkeit reduziert die Belegungszeit der Infrastruktur und kann Raum für zusätzliche Trassen schaffen.

Emde (2012, S. 146) folgert nach seiner vergleichenden Untersuchung der Strecke Berlin - Hamburg, dass die Haltedifferenzierung keine Auswirkung auf die Anzahl möglicher Güterzugtrassen hat, solange der zeitliche Abstand zwischen haltenden Zügen und schnellen Zügen so groß ist, dass ein Güterzug den regelmäßig haltenden Zügen direkt folgen kann. Emde zeigt, dass dies an seiner untersuchten Strecke im Großraum Berlin der Fall ist, wohingegen im Großraum Hamburg die Trassenlagen des Personenverkehrs ungünstig liegen zur Konstruktion von zusätzlichen Güterzugtrassen. Im Vergleich der beiden Fahrplanjahre 2002 und 2012, zwischen denen die Haltedifferenzierung im Regionalverkehr auf der Strecke eingeführt wurde, stellt Emde fest, dass sich die Gesamtreisezeiten der Güterverkehrszüge an der Reisegeschwindigkeit der langsamsten Regionalverkehrszüge ausrichten. Eine Differenzierung im Personenverkehr, die zur abschnittsweisen Erhöhung der Reisegeschwindigkeit dieser Züge führt, verkürzt an seinem Beispiel folglich auch die Zeit, die Güterverkehrszüge zum Passieren der gesamten Strecke benötigen. Emde (2012, S. 145) führt aber auch aus, dass die Güterzüge in seinem Szenario

[112] Siehe Hörstel u. a. (1993b, S. 84).

[113] Ein Beispiel sind die Expresszüge zwischen Markt Schwaben und München Ostbahnhof, die nur unter Auslassen von Zwischenhalten (sowie ein zusätzliches Blocksignal) eingerichtet werden konnten. Vgl. Ausführungen dazu in Kapitel 4.5 auf Seite 132.

bei einer größeren Geschwindigkeitsschere[114] öfter überholt werden müssen und so Zeit verlieren.

Neben der Strecke selbst sind insbesondere im Stadtschnellbahnbetrieb die Stationen maßgeblich für die nutzbare Kapazität der Infrastruktur, da die zum Fahrgastwechsel und zur Zugabfertigung notwendigen Haltezeiten oftmals länger sind als die auf der Strecke technisch mögliche Zugfolgezeit.[115] Meier u. Wörner (1993, S. 320), Bauer u. Eilers (1993, S. 312), Vallee (2003, S. 658) sowie zuletzt o.A. (2013c) stellen als Engpass der Leistungsfähigkeit des Stuttgarter S-Bahn-Systems die Station Hauptbahnhof mit nur einer Bahnsteigkante je Richtung dar. Die Aufenthaltszeit aufgrund erhöhten Fahrgastwechsels definiere hier die Leistungsfähigkeit der gesamten Stammstrecke.[116] Entsprechend kann das Auslassen von Zwischenhalten auch aus der Motivation heraus sinnvoll sein, verlängerte Haltezeiten einzusparen, um so Kapazität auf einem Streckenabschnitt zu schaffen.[117] Angewendet wird dieses Mittel neben den in Abschnitt 3.2.1.3 dargestellten verkehrlichen[118] auch aus betrieblichen Gründen auf dem östlichen Ast der RER-Linie A nach Marne-la-Vallée in Paris, da das die dichte Zugfolge ermöglichende Zugbeeinflussungssystem nur auf der Stammstrecke vorhanden ist und somit vor Beginn der Stammstrecke ein größerer Zugfolgeabstand notwendig ist. Dieser wird dort erreicht, indem Zwischenhalte ausgelassen werden.

Das bei Kaas u. a. (2006, S. 4) beschriebene *Gleichgewicht der Kapazität von Eisenbahnstrecken* fasst die gemachten Aussagen zusammen. Dabei bewegt sich ein homogenes System oder eine Stammstrecke mit an allen Stationen haltenden, gleichartigen Zügen im Bereich der höchsten Zugzahlen mit einer höheren Betriebsstabilität, jedoch einer vergleichsweise geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit als ein gemischtes System mit differenzierten Haltekonzepten.

Durch Hierarchisierung und abschnittsweise Expressführung können sich je nach Anzahl der ausgelassenen Halte, gefahrener Höchstgeschwindigkeit und Stationsabstand kann mitunter die Anzahl nutzbarer Trassen auf einer Strecke erhöht werden.

---

[114] Am Beispiel der Strecke Berlin - Hamburg fahren die Fernverkehrszüge bis zu 230 km/h, während der Güterverkehr mitunter nur 80 km/h schnell fährt.

[115] Verschärft hat sich die Thematik der Haltezeiten in der jüngeren Vergangenheit durch von der Aufsichtsbehörde oder den Aufgabenträgern geforderte ausfahrbare Trittstufen, die erst nach Stillstand des Zuges aus- und nach der Türschließung einfahren dürfen, wodurch die Haltezeit um mehrere Sekunden verlängert wird. Vgl. u. a. Iffländer (2013, S. 19) und o.A. (2015a).

[116] Die gleiche Erkenntnis findet sich auch bei Heinrich (1970, S. 104) verallgemeinert zu der *„Zugfolge auf Strecken mit sehr kurzen Bahnhofs-Abständen“*.

[117] Diese Sichtweise ist natürlich einseitig und blendet die verkehrlichen Aspekte aus. Vgl. dazu Abschnitte 3.2.1.6 und 3.2.1.7.

[118] Es geht um eine annähernd gleichmäßige Auslastung der Züge am Beginn der Stammstrecke.

3.2.2.6.2. Beschreibung von Expressfahrten

Die Relevanz von Fahrten, die einen oder mehrere Zwischenhalte auslassen, bezogen auf alle Fahrten eines Netzes lässt sich über den Anteil derartiger Fahrten ausdrücken. Dies wird als *Gesamtanteil Expressfahrten in der HVZ* (η_{Ex}) bezeichnet und bestimmt sich aus dem Quotienten der Fahrten, die mindestens einen Zwischenhalt auslassen, und der Gesamtzahl an Fahrten in der HVZ. Ferner wird dieser Parameter für jeden Streckenabschnitt erhoben ($\eta_{Ex,S}$). Eine Fahrt wird hier bezogen auf einen Streckenabschnitt als Expressfahrt gezählt, wenn sie an der Station am Ende des Abschnittes nicht hält. Damit ist erkennbar, ob sich die Expressfahrten eines Netzes auf wenigen Strecken konzentrieren oder ob es sich um ein im größten Teil des Netzes eingesetztes Mittel der Differenzierung handelt.

Die Größe der Blöcke in direkter Folge ausgelassener Halte (N_D) ist nützlich, um beispielsweise die von Vuchic (1981, S. 65) als *skip-stop operation* bezeichnete abwechselnde Bedienung von Halten durch mehrere sich überlagernde Fahrten, zu erkennen.[119]

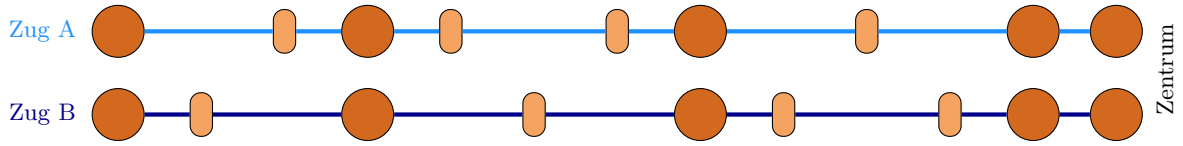

Abbildung 3.2.3: Skip-Stop-Bedienung [eigene Darstellung nach Vuchic (1986)].

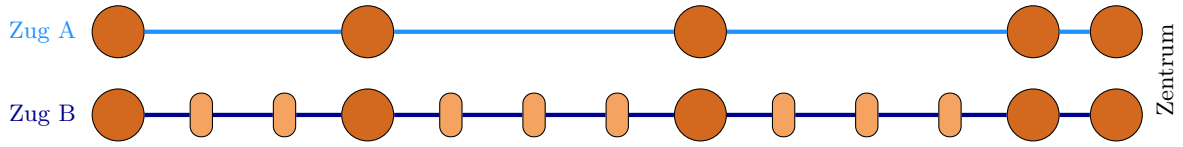

Abbildung 3.2.4: Expressbedienung [eigene Darstellung nach Vuchic (1986)].

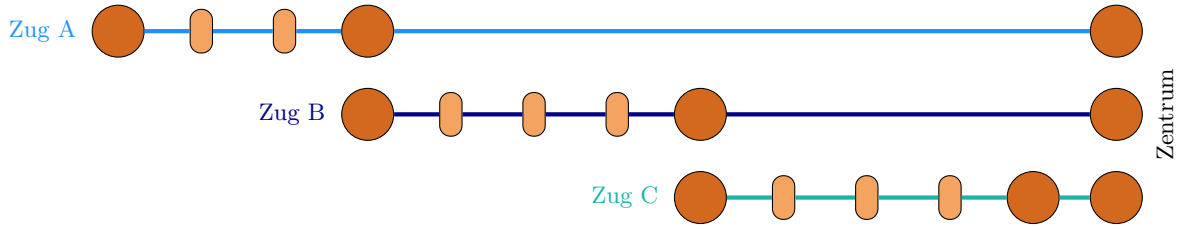

Abbildung 3.2.5: Zonenbedienung [eigene Darstellung nach Vuchic (1986)].

[119] Vgl. Abbildung 3.2.3.

Als dritter Aspekt wird der *Anteil der ausgelassenen Halte an der Gesamtzahl der Halte einer Fahrt* (η_D) erhoben, um herauszustellen, ob es sich um ausgesprochene Expressfahrten handelt, die insgesamt nur wenige Halte bedienen.[120] Dieser Quotient berücksichtigt nur Fahrten, die mindestens einen Halt auslassen. Fahrten, die zunächst wenige bzw. keine Stationen auslassen und anschließend im weiteren Verlauf viele Stationen durchfahren, fallen unter die in Abbildung 3.2.5 dargestellte *zonale Bedienung*. Auch Fioc (1964, S. 64) nennt dies *Zonenbedienung* und merkt an, dass durch diese Bedienungsform die *„Fahrgäste mit den längsten Heimwegen keine übermäßig langen Fahrzeiten ... haben"*. Juhnke (1966b, S. 94) stellt als Vorteil entsprechend auch die höhere Reisegeschwindigkeit als beim Halt aller Züge an allen Stationen heraus. Fioc (1964, S. 64) ergänzt jedoch auch, dass dieses Konzept nicht dazu führe, dass auf einer Strecke das Maximum an Transportkapazität erzielt werden könne.

Zuletzt ist für die örtliche Lage sowie die Bewertung der Reisezeiteinsparung von Interesse, mit welcher Geschwindigkeit die Züge an Stationen durchfahren. Dazu wird auf Basis der verfügbaren betrieblichen Daten der Infrastruktur die zulässige Geschwindigkeit der planmäßig durchfahrenen Stationen als $v_{max,D}$ erfasst. Gibt es in einem Netz keinerlei Durchfahrten, wird die laut Richtlinienwerk zulässige maximale Durchfahrgeschwindigkeit gewählt.

Als weiterer Aspekt ist auch in diesem Kontext die zeitliche Verteilung der Zugfahrten von Relevanz, die in Abschnitt 3.2.1.3 als *Variationskoeffizient der Abfahrtsabstände* (ν_Z) definiert wird.

3.2.2.7. Zugstärkenänderung

Aus der in den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Anzahl der Zugfahrten sowie dem Platzangebot[121] lässt sich meist schließen, ob in Zeiten mit verdichtetem Verkehrsangebot die Zuglänge variiert wird. Da beide Aspekte jedoch bezogen auf einen einzelnen Abschnitt erfasst werden, macht nur eine gemeinsame Betrachtung mehrerer Abschnitte beider Kriterien deutlich, ob die Zuglänge verändert wird. Die Veränderung der Zuglänge im Tagesverlauf erzeugt einen zusätzlichen betrieblichen Aufwand[122], so dass bei der Planung stets abzuwägen ist zwischen zusätzlichen Zugkilometern mit einem (teilweise) leeren Zug und dem Schwächen

[120] Vgl. Abbildung 3.2.4.

[121] Vgl. Abschnitt 3.2.1.1 auf Seite 19 und Abschnitt 3.2.2.5 auf Seite 42.

[122] Je nach betrieblichem Regelwerk kann das Verstärken von Zügen nur auf bestimmten Gleisen und ggf. auch nur unter Mitwirkung von zusätzlichem Personal erfolgen. Zudem kostet das Vereinigen und Trennen Zeit, die sich in Form einer verlängerten Haltezeit niederschlägt. Bei Binder u. a. (2013, S. 338) wird beispielsweise dieses Stärken und Schwächen als ein zentraler Aspekt der zukünftigen Rollmaterialstrategie der SBB genannt.

im Fahrtverlauf unter Inkaufnahme einer längeren Haltezeit am Trennungs- und Vereinigungsbahnhof.

Zur Vereinfachung wird als weiteres Vergleichskriterium die *Zugstärkenänderung pro Streckenabschnitt* eingeführt.[123] Diese wird unterschieden in eine Änderung gegenüber dem Grundangebot, ausgedrückt als Quotient zwischen HVZ und NVZ (η_{ZG}), und eine Änderung im Linienverlauf während der HVZ (l_{ZH}), die den Verstärkungsfaktor wiedergibt. Eine Verdoppelung der Zugstärke[124] bringt entsprechend einen Wert von $2,0$. Sofern es Abschnitte gibt, die außerhalb der HVZ nicht befahren werden, ergibt sich für diese Abschnitte eine minimale Zuglänge von 0.

Da es Beispiele geben kann, bei denen an beiden Linienenden in der HVZ die Zuglänge variiert, wird ferner als weiteres Kriterium die *Anzahl der Zuglängenänderungen im Zuglauf* (N_{ZH}) als absolute Größe pro Zugfahrt erfasst.

3.2.2.8. Streckenbelastung

In Netzen, in denen viele Linien im zentralen Bereich dieselbe Infrastruktur benutzen - zum Beispiel bei gebündelter Führung über eine Stammstrecke[125] - erhöhen differenzierte Betriebskonzepte auf den Außenästen die Komplexität und damit mitunter auch die Störanfälligkeit eines Systems. Netze mit geringer Frequenz oder weitgehend individueller Infrastruktur für jeden Korridor bieten größere Freiheiten.

Zur Beschreibung wird die abschnittsweise genutzte Streckenbelastung, ausgedrückt in *Zügen pro Stunde und Gleis* ($N_{ZZ,G,max}$), herangezogen. Der reinen Anzahl der Züge wird zur Vereinfachung in der Bewertung Vorrang eingeräumt gegenüber einer umfassenden Kapazitätsausnutzungsbetrachtung.[126] Im Gegensatz zu der technischen Mindestzugfolgezeit, deren Berechnung abhängig von dem Fahrtengefüge, dem Halteregime sowie der technischen Ausstattung der Strecke sein kann,[127] lässt sich dieser Parameter aus den frei zugänglichen Fahrplandaten ablesen und wird als hinreichend genau betrachtet. Da es in einigen Netzen mehr als ein Streckengleis pro Richtung gibt, wird die tatsächliche (planmäßige) Nutzung der Gleise

[123] Da hier primär das Platzangebot betrachtet wird, muss präzisiert werden, dass im eigentlichen Sinne die Zugstärke anstelle der Zuglänge betrachtet wird. Denn ein größeres Platzangebot kann auch durch den Einsatz anderer Fahrzeuge mit identischer Zuglänge jedoch größerem Platzangebot erreicht werden.

[124] Unter der Zugstärke wird hier das in den Fahrzeugen verfügbare Platzangebot verstanden und nicht die Zuglänge. Vgl. Erläuterungen in Abschnitt 46 auf Seite 20.

[125] Ein Beispiel ist die Münchener S-Bahn mit ihrem Stammstreckentunnel. Vgl. Abschnitt 4.5 auf Seite 132.

[126] Vgl. UIC-Richtlinie 406, sowie u. a. Huber u. Warninghoff (2012); Landex (2007).

[127] Vgl. Pachl (2008, S. 160), Pachl (2015, S. 5ff.).

berücksichtigt, so dass dieser Parameter die maximal auf einem Gleis pro Stunde verkehrenden Züge liefert.[128] Daneben wird mit $N_{ZZ,S,max}$ die maximale Anzahl an Zügen pro Stunde und Richtung erfasst. Dabei findet die Anzahl parallel nutzbarer Gleise keine Beachtung. Auf zweigleisigen Strecken mit Einrichtungsbetrieb pro Gleis gilt $N_{ZZ,G,max} = N_{ZZ,S,max}$. Gibt es in eine Richtung mehr als ein befahrenes Gleis, gilt $N_{ZZ,S,max} > N_{ZZ,G,max}$. Auf eingleisigen Streckenabschnitten ist somit $N_{ZZ,S,max} < N_{ZZ,G,max}$.

3.2.2.9. Zugbeeinflussung

Da das Zugbeeinflussungssystem einen großen Einfluss auf die mögliche Zugfolgezeit und damit die Kapazität einer Strecke hat, wird die Art des Systems ebenfalls erfasst. Systeme mit Führerstandssignalisierung und kontinuierlicher Überwachung und Beeinflussung unterscheiden sich hier deutlich von Systemen mit punktueller Beeinflussung. Die Systeme werden in Anlehnung an Maschek (2013, S. 536) in folgende Cluster eingeteilt, um die entscheidenden Unterschiede zu erfassen:

- keines, nur ortsfeste Signale (NoS) [1]
- punktförmig, ohne Vorsignalbeeinflussung (PoV) [10]
- punktförmig, mit Vorsignalbeeinflussung (PmV) [100]
- punktförmig, mit Vorsignalbeeinflussung und Führerstandssignalisierung (PmVF) [1000]
- kontinuierlich, ohne Führerstandssignalisierung (KoF) [10000]
- kontinuierlich, mit Führerstandssignalisierung (KmF) [100000]

Um die Systeme vergleichen zu können, ist eine einheitliche, sortierbare Beschreibung der einzelnen *Zugbeeinflussungssysteme* (ZUB) notwendig. Daher werden sie aufsteigend in der oben genannten Reihenfolge ihres Automatisierungsgrades bewertet. Da es in den einzelnen Netzen mehrere Systeme geben kann - entweder als Parallelausrüstung oder auf unterschiedlichen Teilen der Netze -, wird das Zugbeeinflussungssystem im Binärsystem ausgedrückt. Das System ohne jegliche Automatisierung und Beeinflussung (NoS) bekommt die letzte Stelle (1), während das kontinuierlich wirkende System mit Führerstandssignalisierung, in dem der Zug durch die Zugbeeinflussung geführt werden kann, den höchsten Wert von 100000 bekommt. Ein Netz, in dem es ein zuvor als KmF bezeichnetes System sowie auf anderen Abschnitten

[128] Dabei wird außer Acht gelassen, dass nicht allein dem betrachteten System angehörige Züge des Fern-, Regional- und Güterverkehrs mitunter die Gleise zusätzlich belegen. Da sich die dichtesten Belegungen jedoch in allen Netzen auf den ausschließlich von den betrachteten Zügen befahrenen Abschnitten bzw. Strecken befinden, wird diese Unschärfe als hinnehmbar betrachtet.

ein PmV-System gibt, würde entsprechend mit 100100 bezeichnet. Damit lässt sich auch dieser Parameter sortieren und vergleichen. Ein Netz mit einer höheren Binärzahl hat einen höheren Ausrüstungsstandard der Zugbeeinflussung.

3.2.2.10. Fahrtlänge

Distanzen können ein Hinweis sein, inwieweit innerhalb eines Systems die Reisezeiten von Relevanz sind und sich der Betrieb von Expresslinien zur Beschleunigung anbietet könnte.[129] Bei kleinen Ballungsräumen mit vergleichsweise kurzen Distanzen ergeben sich kürzere Linienlängen, so dass die Wirkung von beschleunigten Fahrten geringer ausfallen dürfte als bei längeren Strecken.

Die Länge der Fahrten hat jedoch auch eine betriebliche Relevanz, da die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Verspätungen mit zunehmender Fahrtlänge und Anzahl an Halten mit Fahrgastwechsel als potenzielle Urverspätungsquelle zunimmt.[130]

Zum Vergleich der Systeme lässt sich die Entfernung der Fahrtendpunkte der Systeme von dem Bereich, den die Fahrgäste in der HVZ in erster Linie ihr Fahrtziel haben, heranziehen. Erfasst wird daher die *Fahrtlänge in Lastrichtung* ($l_{Fahrt,L}$). In eher polyzentrischen Ballungsräumen gibt es mehrere zentrale Punkte, zu denen diese Entfernung berechnet wird. [131]

Zur Unterscheidung von Last- und Gegenrichtung werden die Längen getrennt als $l_{Fahrt,L}$ (Lastrichtung) und $l_{Fahrt,G}$ (Gegenrichtung) erfasst: Die Länge einer Fahrt, die das Stadtzentrum durchquert, bis dorthin in Last- und ab dort gegen die Lastrichtung verkehrt, ergibt sich somit als Summe beider Längen:

$$l_{Fahrt} = l_{Fahrt,L} + l_{Fahrt,G} \tag{3.2.20}$$

Die Homogenität des Netzes lässt sich über die Varianz der Fahrtlängen sehen: Netze mit eher gleichlangen Fahrten haben eine geringere Abweichung als Netze mit wenigen langen und

[129] In diesem Sinne wäre der Beschreibungsparameter dem Abschnitt 3.2.1 zuzuordnen,

[130] Zu Verspätungen, ihren Auswirkungen und ihren Folgen siehe u. a. Hubert (2009); Michelfelder (1953); Rudolph u. Siefer (2009).

[131] Vgl. Joest u. Küsters (1984, S. 337f.) Die Reisenden haben mitunter ihr Fahrtziel nicht im direkt benachbarten Zentrum. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Nachfrage auf den Abschnitten direkt vor den Zentren (z. B. ein Hauptbahnhof im Ruhrgebiet wie Abbildung 3.2.6 zeigt oder eines der *Kreuze* entlang der Berliner Ringbahn) deutlich größer ist als auf den verbindenden Abschnitten.

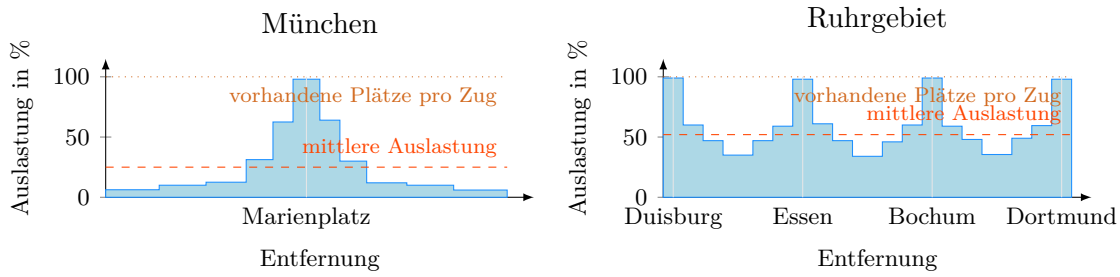

Abbildung 3.2.6: Auslastung von Zügen bei unterschiedlicher Struktur des Ballungsraumes [eigene Darstellung nach Lehmann (1978, S. 20)].

mehreren kurzen Verstärkerlinien. Berechnet wird diese *Varianz der Fahrtlänge* (ν_N) aus den Längen der einzelnen zu betrachtenden Fahrten x:

$$s^2 = \frac{l_{Fahrt,L}}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \tag{3.2.21}$$

$$\nu_N = \frac{s}{\bar{x}} \tag{3.2.22}$$

3.2.2.11. Länge der Hauptverkehrszeit

Der Zeitraum, über den sich die HVZ erstreckt und in dem sie liegt, kann von Netz zu Netz unterschiedlich sein. Länge und Lage variieren mitunter selbst innerhalb eines Ballungsraums aufgrund der Entfernungen. Diese Unterschiede sind in den verschiedenen zu vergleichenden Systemen ohne detailliert aufgeschlüsselte Nachfragedaten nur schwer ermittelbar. Ermittelbar ist jedoch die *Länge der Hauptverkehrszeit* (in Lastrichtung) (t_{HVZ}) auf Basis der Fahrplandaten, die als weiteres Vergleichskriterium herangezogen wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass aus wirtschaftlichen Gründen die sich derzeit aus dem Fahrplan ergebenden dichtesten Zugfolgen nur zu den Zeiten angeboten werden, in denen dies durch die Nachfrage begründet ist.[132] Als Beginn wird der Zeitpunkt definiert, an dem die Angebotsverdichtung beginnt und als Ende der Zeitpunkt, an dem die letzte Verdichterfahrt endet. Bei sehr langen Linien kann sich so eine sehr lange Zeitspanne ergeben, an deren Anfang und Ende nicht auf der ganzen Linie eine Verdichtung des Verkehrsangebotes vorhanden ist. Diese Ungenauigkeit wird an dieser Stelle in Kauf genommen.

[132] Vgl. dazu Anmerkungen zum Platzangebot in Abschnitt 3.2.1.1.

3.2.2.12. Zwischenfazit: Betriebliche Beschreibung

Der betriebliche Produktionsprozess wird untersucht mit drei Schwerpunkten. Den ersten bildet die Analyse der *Belastung*, die vor allem durch die Anzahl an Zugfahrten, jedoch auch durch den Verstärkungsfaktor gegenüber der NVZ beschrieben wird. Den zweiten Schwerpunkt bildet die Ausstattung der *Infrastruktur*. In diesem werden Eigenschaften der Infrastruktur wie die Anzahl der Gleise, die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten sowie das Zugbeeinflussungssystem erfasst. Auch die Ausdehnung des Netzes ist ein Aspekt dieses Bereiches. Der dritten Schwerpunkt fasst die für die Themenstellung der Arbeit im Fokus stehenden Aspekte zusammen. Unter die *Komplexität* fallen die aus der Differenzierung des Verkehrsangebotes fallenden Herausforderungen wie die Ausprägungen von Expressfahrten, die Varianz der Fahrtlänge sowie die Änderungen der Zugformationen.[133]

Nach der zuvor in Abschnitt 3.2.1 erfolgten verkehrlichen Beschreibung, ergänzt dieser Abschnitt 3.2.2 die betriebliche Seite, deren harte Faktoren in Form der zur Verfügung stehenden Infrastruktur sowie deren weiche Faktoren in Form des auf dieser Infrastruktur durchgeführten Betriebes umfassend beschrieben werden.

[133] Vgl. Aufschlüsselung in Tabelle 3.2.2.

Tabelle 3.2.2: Betriebliche Vergleichskriterien für die einzelnen vorgestellten Systeme.

Gruppe	Name	Bezeichnung
Belastung	Größte Anzahl Fahrten pro Stunde und Gleis [pro h und Gleis]	$N_{ZZ,G,max}$
	Größte Anzahl Fahrten pro Stunde, Strecke und Richtung [pro h und Richtung]	$N_{ZZ,S,max}$
	Quotient Anzahl der Zugfahrten	η_F
Infrastruktur	Anzahl Gleise einer Strecke	N_G
	Distanz der Endstellen vom Zentrum [km]	l_N
	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	v_{max}
	Zugbeeinflussungssystem	ZUB
	Zulässige Geschwindigkeit bei planmäßigen Durchfahrten [km/h]	$v_{max,D}$
Komplexität	Änderung der Zugstärke pro Zugfahrt	N_{ZH}
	Anteil der Zwischenendstellen an Endstellen [%]	η_{ZE}
	Anteil Endstellen an Stationen [%]	η_E
	Anteil Expressfahrten in der HVZ pro Strecke [%]	$\eta_{Ex,S}$
	Anzahl Endstellen	N_E
	Anzahl in direkter Folge ausgelassener Halte	N_D
	Quotient Zugfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,G}$
	Gesamtanteil Expressfahrten in der HVZ [%]	η_{Ex}
	Länge der HVZ [h]	t_{HVZ}
	Quotient ausgelassener Halte	η_D
	Varianz der Fahrtlänge [%]	ν_N
	Verstärkungsfaktor pro HVZ-Zugfahrt	l_{ZH}

3.2.3. Wirtschaftliche Beschreibung

Das originäre Ziel der Eisenbahnen ist die Bewältigung der verkehrlichen Aufgaben in Form der Beförderung von Personen und Gütern. In den letzten Jahrzehnten wurde dieses Ziel ergänzt um die wirtschaftliche Komponente. Man könnte sämtliche Kosten eines EVU anteilig umlegen auf jede einzelne Zugfahrt. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die bei einem EVU entstehenden Kosten und lassen die bei dem EIU durch den Betrieb der Infrastruktur und die Vorhaltung der Leitstellen zur Betriebsführung[134] entstehenden Kosten außer Acht, da diese durch die von den EVU zu entrichtenden Trassenentgelte[135] zu finanzieren sind.[136]

[134] Zu nennen sind hier z. B. Stellwerke, Betriebszentralen sowie die Fahrplanerstellung.
[135] Vgl. Abschnitt 3.2.3.2 auf Seite 57.
[136] Der Umstand, dass (in der Regel) die EIU allein mit Trassenentgelten ihre Kosten nicht decken können und Zuschüsse aus öffentlichen Kassen bekommen, wird an dieser Stelle vernachlässigt.

Verschiedene Studien[137] haben die einzelnen Kostenbestandteile einer Zugfahrt detailliert betrachtet. Vereinfachend werden im weiteren Verlauf der Arbeit - basierend auf den zuvor genannten vorhergehenden Studien - als relevante Kostenbestandteile die in den folgenden Abschnitten behandelten Elemente betrachtet.

Auf der anderen Seite stehen den Kosten Erlöse gegenüber. Diese werden nachfolgend zunächst betrachtet.

3.2.3.1. Erlöse im Eisenbahnbetrieb

Den Kosten gegenüber stehen einerseits Einnahmen aus den Fahrgelderlösen[138] sowie gegebenenfalls Zuschüsse oder Bestellerentgelte der öffentlichen Hand.

Bei den Bestellerentgelten im Regionalverkehr gibt es drei unterschiedliche Ansätze. Diese unterscheiden sich darin, welcher Vertragspartner die Risiken bei den Einnahmen - maßgeblich die Fahrgelderlöse - und bei den Kosten zur Betriebsdurchführung trägt.

Bei reinen *Nettoverträgen* trägt das Verkehrsunternehmen sowohl das Einnahme- als auch das Kostenrisiko. Diese Vertragform schafft bei dem EVU Anreize, aktiv um die Fahrgäste zu werben, um die Fahrgelderlöse zu steigern. Bei reinen *Bruttoverträgen* trägt das Verkehrsunternehmen nur das Kostenrisiko, wohingegen die Einnahmen durch den Besteller garantiert werden. Ergeben sich weniger Fahrgelderlöse als geplant, gleicht der Besteller die Differenz aus, so dass das EVU fixe Einnahmen hat. Entsprechend hat das EVU kein direktes Verhältnis zu den Reisenden, da deren Ausbleiben keine finanziellen Nachteile bringt. Die dritte Alternative, bei der der Besteller sowohl Kosten- als auch Einnahmerisiko trägt, ist vor allem im kommunalen ÖPNV anzutreffen. Hier wird das EVU im Prinzip als *Trucker* eingesetzt, der keinerlei Risiken tragen muss, jedoch auch abgesehen von Personalkosten und Unternehmensoverhead keine nennenswerte Spielräume zur Abgrenzung von den konkurrierenden EVU hat.

Dazwischen gibt es diverse Mischformen zwischen Netto- und Bruttoverträgen, die einerseits das Risiko der EVU begrenzen und andererseits dennoch durch eine Beteiligung an den Fahrgelderlösen einen Anreiz zur Fahrgastzahlerhöhung zu schaffen.[139]

Während in den Anfangsjahren nach der Regionalisierung vor allem Bruttoverträge abgeschlossen wurden, scheint es derzeit eine Tendenz zu Nettoverträgen oder Mischformen zu geben,

[137] Vgl. u. a. Baumgartner (2001); Birn u. a. (2010); Dasburg (2008); Michalk (2010).
[138] Zu diesen sind auch die sogenannten erhöhten Beförderungsentgelte zu zählen.
[139] Siehe u. a. auch Mahler (2009, S. 19ff.).

die den EVU Anreize verschaffen, die Reisendenzahlen zu erhöhen und so die Fahrgeldeinnahmen zu steigern. In der Regel beinhalten die Verträge Preisgleitklauseln, die vom EVU nicht zu beeinflussende Kosten ganz oder teilweise an den Besteller weiterreichen.[140] Dazu zählen Trassenentgelte, Stationsgebühren und Energiekosten.[141]

Da im Regionalverkehr trotz zunehmender Verbreitung von Nettoverträgen die Bestellerentgelte - in der Regel an der erbrachten Verkehrsleistung in Form von Zugkilometern - einen nennenswerten Anteil an den Einnahmen der EVU haben, sollte es eine Korrelation zwischen Verkehrsangebot und Nachfrage geben.

Oetting (2005, S. 90) beschreibt die Erlösfunktion für den Personenverkehr als Produkt der drei bedeutenden Einflussgrößen:

- Länge der von einem Zug durchfahrenen Strecke
- Anzahl der Reisenden F in diesem Zug
- spezifischer Erlös je Reisendem und Kilometer

Die Anzahl der Reisenden F kann *„über einen mittleren Besetzungsgrad und die Anzahl der Sitzplätze“* beschrieben werden. (Oetting 2005, S. 93) Der spezifische Erlös je Reisendem und Kilometer wird beeinflusst durch *„zahlreiche Faktoren wie die Reiseweite und den Fahrausweismix“* (Oetting 2005, S. 93) und ist daher nur mit sehr detaillierten (meist unternehmensinternen) Daten zu jedem Verkehrsnetz zu ermitteln.

An die Stelle des spezifischen Erlöses tritt nach Weidmann vereinfacht der durchschnittliche Erlös. Weidmann (2013b, S. 125f.) beschreibt eine vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbeurteilung in der Planungsphase und nennt zur Ertragsschätzung eine Kalkulation mit Hilfe des Produktes aus der Verkehrsleistung in Personenkilometern (Pkm) und dem Durchschnittserlös.

Die Bandbreite der Erlöse in bestehenden Netzen ist groß, da der Erlös für das einzelne EVU abhängig ist von der Nachfrage einer Strecke.[142] Gesucht ist daher für die weitere Betrachtung ein über möglichst große Bereiche errechneter, öffentlich verfügbarer Durchschnittssatz, da konkrete Kosten in der Regel dem Geschäftsgeheimnis der Beteiligten unterliegen. Blum u. a. (2012, S. A2-2) nennen 0,08 EUR/Pkm als Erlössatz im SPNV in Österreich. o.A. (2014a, S. 28) nennt unter Verweis auf den Geschäftsbericht der SBB 2012 einen durchschnittlichen Erlössatz

[140] Vgl. dazu Klein (2011, S. 12).
[141] Vgl. Ausführungen zu den Kosten in Kapitel 3.2.3 auf Seite 53.
[142] Vgl. auch Ausführungen zu Vertragsarten in Abschnitt 19 auf Seite 10.

von umgerechnet 0,15 EUR/Pkm für den SBB-Personenverkehr in der gesamten Schweiz.[143] Die im Regionalverkehr aktive Schweizerische Südostbahn AG (SOB) nennt in Roth (2015) für das Jahr 2014 einen durchschnittlichen Ertrag von umgerechnet 0,17 EUR/Pkm. o.A. (2015b, S. 14) nennt für das Jahr 2014 auf dem deutschen SPNV-Markt einen mittleren Umsatz von 0,07 EUR/Pkm als reinen Markterlös und unter Berücksichtigung der gezahlten Bestellerentgelte einen Wert von 0,19 EUR/Pkm.[144] Das legt nahe, dass der bei Blum u. a. für Österreich genannte Wert eher der reine Markterlös ist, während bei den schweizerischen Werten von o.A. und Roth jeweils die gezahlten öffentlichen Zuschüsse enthalten sind.

Da die Mehrheit der betrachteten Netze[145] in Deutschland oder dem europäischen Ausland liegen, wird als durchschnittlicher Erlös der die Bestellerentgelte berücksichtigende Wert von 0,19 EUR/Pkm angesetzt.

Vereinfachend wird - der ausführlicher in Abschnitt 3.2.1.1 dargestellten Annahme eines wirtschaftlichen Platzangebotes im Status Quo folgend - das Sitzplatzangebot in Form von Platzkilometer (Plkm) anstelle der realen Personenkilometer angesetzt.[146] Der Erlössatz beträgt damit 0,19 EUR/Plkm und ergibt zusammen mit dem Platzangebot den zu erwartenden *Erlös* (E). Damit wird auf den Außenästen der Netze eher eine zu große und auf den zentrumsnahen, in der Regel wesentlich stärker ausgelasteten Abschnitten eine zu niedrige Nachfrage unterstellt, was beim Blick auf den ermittelten Erlöswert entsprechend zu berücksichtigen ist. Für die Vergleichbarkeit genügt dieser Ansatz, da diese Unschärfe alle Fallstudien gleichsam betrifft.

Um den für den Erlös ermittelten Wert, der aufgrund der Definition nur ein grober Anhaltspunkt sein kann, in ein Verhältnis zu stellen, wird die *Länge der eingesetzten Zugformationen* (l_{Zug}) erhoben. Damit wird neben dem von der Sitzplatzanzahl abhängigen Erlöswert deutlich, mit wie langen Formationen die Leistung erbracht wird. So können auch vermeintliche Unschärfen der gewählten Erlösrechnung deutlich werden, da insbesondere im Nahverkehr nicht von einer niedrigen Sitzplatzanzahl automatisch auf eine geringe Gesamtplatzkapazität eines Fahrzeuges geschlossen werden kann. Zeigt die Erhebung der Formationslänge daher im Vergleich mit dem errechneten Erlös ein vergleichsweise großes Fahrzeug, ist von einer großen Stehplatzkapaziät auszugehen.

[143] Dieser Wert, berechnet aus der Verkehrsleistung im Personenverkehr sowie dem Verkehrsertrag sowie den Abgeltungen für den Regionalverkehr beträgt für das Jahr 2016 0,19 EUR/Pkm. (Quelle: https://reporting.sbb.ch, Zugriff am 23. März 2017.)

[144] Diese Werte sind laut der Darstellung im Diagramm in o.A. (2015b, S. 14) in den letzten fünf Jahren (gerundet) konstant.

[145] Zur Begründung der getroffenen Auswahl siehe Abschnitt 4 auf Seite 76.

[146] Vgl. dazu auch die Ausführungen zur Nicht-Verfügbarkeit von von detaillierten Nachfragezahlen in Abschnitt 3.2.1.1 auf Seite 19.

3.2.3.2. Kosten zur Trassenbenutzung

Das Trassenentgelt ist ein von dem EVU an das EIU zu zahlendes Entgelt, das sich aus mehreren Komponenten zusammensetzt. Seine Höhe ist aus den durch den Zugbetrieb entstehenden Kosten zu ermitteln (Garstenauer 2005, S. 183) und soll *„die Kosten für Betrieb und Instandhaltung des Streckennetzes [ganz oder teilweise decken].“* (Leister 2015, S. 47) Das von EIU aufgestellte Trassenpreissystem kann sowohl Komponenten in Abhängigkeit der zurückgelegten Streckenkilometer als auch feste Faktoren aufgrund besonderer Eigenschaften und Anforderungen an die Fahrplantrasse beinhalten. Diese können beispielsweise die Zuglänge, die Traktionsart, das Zuggewicht, die Geschwindigkeit oder besondere Anforderungen an die Bevorrechtigung im Betrieb sein. Darüber hinaus sind auch Anreize beispielsweise für die Benutzung schwach ausgelasteter Strecken oder Aufschläge für das Befahren stark ausgelasteter Abschnitte möglich, durch die EIU und EVU einen *„materiellen Anreiz ... [bekommen,] ihr Verhalten zu ändern“*. (Schmidt u. a. 2008, S. 1)

Die DB Netz AG unterscheidet in ihrem Trassenpreissystem nach nutzungsabhängigen (Streckenkategorien, Trassenprodukte[147]) und leistungsabhängigen Komponenten (Auslastungsfaktor, Mindestgeschwindigkeit) sowie sonstigen Entgeltkomponenten (Lastkomponente). Dabei wird der eigentliche Trassenpreis je Trassenkilometer aus dem durch die Streckenkategorie und die zurückgelegte Strecke gebildeten Grundpreis gebildet, der mit dem Faktor des Trassenprodukts und leistungsabhängigen Komponenten multipliziert wird, bevor schlussendlich die Lastkomponente addiert wird.[148]

Ein Trassenpreissystem kann darüber hinaus Elemente enthalten, die den EVU Anreize zu einer pünktlichen Durchführung der Zugfahrt und dem EIU Anreize zur Bereitstellung guter Betriebsbedingungen auf der Infrastruktur geben. Beispiele sind hier Rückzahlungen des EIU an die EVU im Falle von Verspätungen aus vom EIU zu vertretenden Gründen oder Zahlungen des EVU an das EIU, wenn durch einen von dem EVU zu vertretenden Grund Verspätungen auf der Infrastruktur entstehen.[149]

Durch das Trassenentgelt sollen sämtliche beim EIU anfallenden Kosten[150] auf die EVU umgelegt werden. Ferner darf das EIU eine *marktübliche Rendite* durch die Trassenentgelte erzielen.[151] Im Trassenentgelt enthalten sind neben den Kosten für die eigentliche Durchführung der

[147] Bei den Trassenprodukten werden Personen- und Güterzüge unterschieden. Innerhalb der beiden Gruppen gibt es vier Produkte, beispielsweise Expresstrassen, die besonders hohe Ansprüche an die Betriebsdurchführung stellen, oder besonders günstige Trassen, die geringere betriebliche Anforderungen haben. (Butzbach 2005a)

[148] Eine detaillierte Beschreibung findet sich in DB Netz AG (2011).

[149] Vgl. dazu u. a. Butzbach (2005b).

[150] Personal und Infrastruktur zur Betriebsdurchführung, Abnutzung der Schienen, Instandhaltungskosten, ...

[151] Siehe §14 Allgemeines Eisenbahngesetz der Bundesrepublik Deutschland (AEG).

Zugfahrt auch die Konstruktion der Fahrplantrasse sowie die Bereitstellung der für die Durchführung erforderlichen betrieblichen Unterlagen. Die durch das Trassenentgelt abgegoltenen Leistungen des EIU werden in von diesem aufzustellenden Nutzungsbedingungen geregelt.[152]

Seyb (2009, S. 10) beziffert den durchschnittlichen Anteil der Trassenentgelte an den Gesamtkosten eines EVU im Regionalverkehr mit 41 Prozent. Geyer (2014, S. 12) bestätigte einige Jahre später diesen Anteil.

Das Trassenentgelt ist direkt an eine Zugfahrt gebunden und wird maßgeblich durch die durch die Fahrt zurückgelegte Entfernung beeinflusst. Eine Umlegung der Zuschüsse aus öffentlichen Kassen in die Eisenbahninfrastruktur, die theoretisch ebenfalls zu den Kosten zu zählen sind, wird an dieser Stelle nicht vorgenommen.[153] Gemäß der zuvor gemachten Erläuterungen werden vereinfachend die zurückgelegten Kilometer als *Fahrtlänge* (l_{Fahrt}) zum Vergleich des Trassenentgeltaufwandes herangezogen,[154] da die monetäre Betrachtung aufgrund mitunter stark unterschiedlicher kilometerbasierter Kostensätze der Trassenpreissysteme der Vergleichbarkeit zuwiderlaufen würde.

3.2.3.3. Kosten zur Stationsbenutzung

Wie die Strecken werden auch die Verkehrsstationen des Personenverkehrs von einem EIU betrieben.[155] Beim Halt an einer Station muss das EVU ein Stationsentgelt an das EIU entrichten.[156] Dieses ist in der Regel abhängig von der Bedeutung der Station, insbesondere ihrem Verkehrsaufkommen sowie den dort haltenden Zuggattungen und ihrer Ausstattung.

Das Stationspreissystem *SPS 11* der DB Station & Service AG ordnet jede Station einer Kategorie zu, die sich nach der Anzahl der Bahnsteigkanten, der maximalen Länge der Bahnsteige, der Anzahl der Reisenden und der Zughalte, dem verfügbaren Serviceangebot sowie der technischen Stufenfreiheit richtet. Getrennt nach den Bereichen der Aufgabenträger im SPNV werden dann die Gesamtkosten, die wie bei den Trassenentgelten auch einen Aufschlag für eine marktübliche Rendite beinhalten, ermittelt.[157]

[152] Die DB Netz AG bezeichnet diese als *Schienennetznutzungsbedingungen* (SNB).
[153] Eine detaillierte Analyse unterschiedlicher Trassenpreissysteme ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Zu den Investitionszuschüssen in das deutsche Schienennetz siehe u. a. Hauswald (2009, S. 73ff.).
[154] Vgl. Abschnitt 3.2.2.10.
[155] Derzeit größer Betreiber von Personenbahnhöfen in Deutschland ist die DB Station & Service AG, ein Tochterunternehmen der Deutschen Bahn AG.
[156] Dieser Abschnitt beschreibt die Situation in Deutschland. Im Ausland gibt es teilweise abweichende Regelungen, beispielsweise im Trassenentgelt inbegriffene Stationsbenutzung wie in der Schweiz. Vgl. Eisenbahn-Netzzugangsverordnung vom 25. November 1998 des Schweizerischen Bundesrates.
[157] Vgl. I.SVP (2010).

Den durchschnittlichen Anteil der Stationsentgelte an den Gesamtkosten beziffern Seyb (2009, S. 10) und Geyer (2014, S. 12) mit neun bzw. zehn Prozent, wodurch sich ein Anteil der Infrastrukturbenutzungskosten von 50 Prozent an den Gesamtkosten eines EVU im Regionalverkehr ergibt.[158]

Der wichtigste Kostentreiber bei der Summe der Stationsgebühren des gesamten Verkehrsangebotes eines EVU ist die Anzahl der Halte. In diesem Punkt unterscheiden sich Systeme, in denen alle Züge an sämtlichen Stationen halten und solche mit Expressbedienungen. Dass die unterschiedlichen Stationspreissysteme meist mit verschiedenen Kategorien für die einzelnen Verkehrsstationen arbeiten und damit womöglich Knotenbahnhöfe, an denen vermehrt Expresszüge halten, teurer sind als Stationen, an denen eher durchgefahren wird, sei an dieser Stelle vernachlässigt.

Als Größe wird daher das Verhältnis zwischen tatsächlich haltenden Zügen - also jenen, für die Stationsgebühren zu entrichten sind - und allen an einer Station verkehrenden Zügen (inklusive der Durchfahrenden) erfasst und als *Quotient haltender und durchfahrender Züge* (η_{DH}) bezeichnet:

$$\eta_{DH} = \frac{n_{Halte}}{n_{Fahrten}} \tag{3.2.23}$$

Derart berechnet, gilt $\eta_{DH} = 1$ an Stationen, an denen alle Züge halten. Der Wert wird kleiner, wenn einige Züge ohne Halt durchfahren. Mit Blick auf die spätere vergleichende Darstellung[159] wäre auch der reziproke Wert sinnvoll, da ein Halt aller Züge an einer Station eine geringere Differenzierung darstellt als einzelne durchfahrende Züge. Der dargestellten Definition wird jedoch im Kontext der wirtschaftlichen Betrachtung der Vorzug gegeben.[160]

Ein weiterer Aspekt, der jedoch fundierte Kenntnisse der jeweiligen Stationspreissysteme erfordert, ist der Umgang mit der Zuglänge. Da längere Züge mehr Kapazität der Infrastruktur beanspruchen und zudem längere Bahnsteige erfordern, enthalten Stationspreissysteme teilweise auch einen Zuglängenfaktor.[161] Aufgrund der fehlenden Datenlage wird dieser Aspekt hier jedoch vernachlässigt.

[158] Klein (2011, S. 4) bezifferte diesen Anteil einige Jahre zuvor auf 45 Prozent.

[159] Vgl. Abschnitt 3.3.

[160] Das Auslassen von Zwischenhalten findet in der betrieblichen Betrachtung in mehreren Kriterien Beachtung, u. a. in dem Quotient ausgelassener Halte.

[161] Die Belegungszeit eines Blockabschnittes ist bei größerer Zuglänge und gleicher Geschwindigkeit länger, da die Räumfahrzeit größer wird. Vgl. dazu z. B. Pachl (2015, S. 5f.). Daher enthalten auch Trassenpreissysteme mitunter Zuglängenfaktoren.

3.2.3.4. Aufwand für Leerfahrten

Der eigentliche finanzielle Aufwand der EVU für umlaufbedingte Leerfahrten ist mit den zuvor beschriebenen Trassenentgelten[162] sowie den später beschriebenen Personalkosten sowie den durch diese Fahrten nicht zu erzeugenden Erlös beschrieben.

Die Kosten werden geschmälert, wenn diese Leerfahrten von den Aufgabenträgern ganz oder teilweise vergütet werden. Informationen dazu sind jedoch bislang für die wenigsten Netze zugänglich,[163] so dass hilfsweise anstelle der konkreten Kosten bzw. Kostenanteile ein anderes Beschreibungskriterium erforderlich ist. Um die Bedeutung von Leerfahrten entgegen der Lastrichtung erkennen zu können, wird analog der Beschreibung in Abschnitt 3.2.2.4 ein zweiter Quotient ($\eta_{F,GL}$) ermittelt, der entgegen der Lastrichtung nur die Leerfahrten (GL) berücksichtigt:

$$\eta_{F,GL}(a) = \begin{cases} \frac{\sum^{i}(n_{Fahrten\ GL\ i})}{\sum^{j}(n_{Fahrten\ L\ j})} & , \text{ mit Leerfahrten in Gegenrichtung} \\ 0 & , \text{ ohne Leerfahrten in Gegenrichtung} \end{cases} \tag{3.2.24}$$

Durch beschleunigte Fahrten gegen die Lastrichtung ergibt sich neben eingesparter Umlaufzeit des Rollmaterials auch eine Reduktion der notwendigen Personaleinsatzzeit, auf die im Abschnitt 3.2.3.5 eingegangen wird.

3.2.3.5. Personalaufwand

Zum Bewegen von Fahrzeugen bedarf es mindestens eines Triebfahrzeugführers.[164] In Abhängigkeit von Fahrzeug, Strecke und sonstigen betrieblichen und verkehrlichen Anforderungen kann darüber hinaus weiteres Personal, beispielsweise als Zugbegleitpersonal zur Kundenbetreuung, erforderlich sein.

Bei einer Verkürzung der Umlaufzeit durch Leerfahrten entgegen der Lastrichtung oder das abschnittsweise Auslassen von Zwischenhalten, kann die Personaleinsatzzeit reduziert und damit die Produktivität des Personals erhöht werden.[165]

---

[162] Stationsentgelte können je nach Stationspreissystem auch anfallen.

[163] Im neuen Verkehrsvertrag für das *Teilnetz Ring* des Berliner S-Bahn-Netzes, der öffentlich zugänglich ist, wird auf derartige Leerfahrten eingegangen. Vgl. o.A. (2016d, S. 79ff.).

[164] Vollautomatischer Betrieb ist außerhalb von geschlossenen Stadtschnellbahnsystemen bislang noch ohne Relevanz.

[165] Wenngleich dies womöglich bei Betrachtung einzelner Fahrten und Umläufe aufgrund besonderer äußerer Zwänge nicht der Fall ist, lässt sich diese Reduktion der Einsatzzeit bei größerem Maßstab über ganze Netze stets nachweisen.

Die Zuweisung der Personalkosten auf eine einzelne Zugfahrt lässt sich - ohne detaillierte Kostentabellen eines EVU - nur pauschal anhand von durchschnittlichen Kostensätzen vornehmen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird als Vergleichsmaßstab anstelle konkreter Personalkostensätze die Personaleinsatzzeit verwendet, wodurch unterschiedliche Lohnhöhen aufgrund unterschiedlicher Tarifverträge nivelliert werden. Bei konkreten Anwendungsfällen könnten diese Einsatzzeiten mit den tatsächlichen Kostensätzen multipliziert werden, um exakte Aussagen zu bekommen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird für die Personalkosten pro Zugfahrt der nichtmonetarisierte Vergleichswert der *Personaleinsatzzeit* verwendet. Dabei wird vereinfachend bei allen Systemen die reine Zeit in den Fahrzeugen zwischen Abfahrt am Start- und Ankunft am Zielbahnhof gemessen. Über die reine Fahrzeit hinausgehende Zeiten für Vor- und Nachbereitungen an Fahrzeugen, Rangierzeiten, notwendige Wegezeiten, Pausen und andere zwingende Bestandteile von Diensten werden nicht betrachtet.[166] Da davon auszugehen ist, dass heutzutage ein schlechter Dienstplanwirkungsgrad[167] nicht mehr hingenommen wird, wird die Personaleinsatzzeit maßgeblich durch die Dauer der Fahrten bestimmt. Analog der Beschreibung zur Fahrtlänge in Abschnitt 3.2.2.10 werden die Zeiten zur Unterscheidung von Last- und Gegenrichtung getrennt als $t_{Fahrt,L}$ (Lastrichtung) und $t_{Fahrt,G}$ (Gegenrichtung) erfasst: Die *Dauer einer Fahrt* (t_{Fahrt}), die das Stadtzentrum durchquert und bis dorthin in Last- und ab dort gegen die Lastrichtung verkehrt, ergibt sich somit als Summe beider Dauern:

$$t_{Fahrt} = t_{Fahrt,L} + t_{Fahrt,G} \tag{3.2.25}$$

Vernachlässigt wird hier der gegebenenfalls unterschiedliche Personalbedarf je nach eingesetztem Fahrzeugmaterial. Zur Schaffung einer Vergleichbarkeit wird dies jedoch bewusst in Kauf genommen, da jüngere Fahrzeuge ohne betrieblich notwendiges Zugbegleitpersonal verkehren können und die in einigen der betrachteten Netze noch verkehrenden älteren lokbespannten Züge in der näheren Zukunft Schritt für Schritt durch Neufahrzeuge ersetzt werden.

3.2.3.6. Fahrzeugkosten

Die Umlegung der Kosten für Triebfahrzeuge und Wagen auf eine einzelne Zugfahrt ist schwer, weshalb in der Regel als Vergleichswert die Laufleistung herangezogen wird.

[166] Vgl. dazu die ausführliche Beschreibung in Scholz (2011, S. 244ff.).

[167] Vgl. z. B. die Definition von Reinhardt (2012, S. 472): *„Das Verhältnis der Summe der Einsatzzeiten aller Umläufe zur Summe aller Dienstlängen ist der Dienstplanwirkungsgrad.“*

Zu den Kosten, die durch das Fahrzeug verursacht werden, zählen sowohl unabhängig von dem Betrieb anfallende fixe Kosten als auch in Abhängigkeit zu der Laufleistung stehende Kosten. Zu der ersten Gruppe sind die Investitionskosten zu zählen. Diese fallen entweder für die Anschaffung, die Miete oder das Leasing der Fahrzeuge an. Nicht unerheblich sind zudem die Kosten für die in Deutschland nach §32 Abs. 3 EBO unabhängig von der Laufleistung alle sechs Jahre durchzuführende Hauptuntersuchung.[168] In der Gruppe der laufleistungsabhängigen Kosten sind die Betriebsstoffe (Sand, Öl, ...) sowie der Großteil der Wartung und Instandhaltung zu finden. (Meimbresse u. Michalk 2012, S. 13f.)

Im Rahmen der Arbeit werden die Energiekosten explizit getrennt von den Fahrzeugkosten betrachtet.[169] So sind als Fahrzeugkosten nur die Bestandteile von Relevanz, die in Abhängigkeit zu der Laufleistung eines Fahrzeuges stehen, auf diese umgerechnet werden können und nicht zu den Energiekosten zu zählen sind. Hier können durch längere Laufwege, höhere Reisegeschwindigkeiten und kürzere Umlaufzeiten höhere Laufleistungen entstehen, die die Kosten steigen lassen.

Bei allen auf den zurückgelegten Fahrzeugkilometern basierenden Aussagen zu Kosten wird auf die in Tabelle 3.2.3 dargestellten Referenzfahrzeugtypen Bezug genommen,[170] die ausführlich von Birn u. a. (2010, S. 3-34, 3-39) beschrieben werden. Hinter diesen Fahrzeugen verbergen sich keine real existierenden Fahrzeuge. Es handelt sich vielmehr um Cluster, die mehrere aktuell im Einsatz befindliche Fahrzeugtypen zusammenfassen. Aus den von Birn u. a. aufgeführten Referenzfahrzeugtypen werden diejenigen ausgewählt, die den in Kapitel 4 verwendeten Grundtypen entsprechen. In Birn u. a. (2010, S. 3-35f.) wurden diese Kostensätze auf Basis der durchschnittlichen Einsatzzeiten ermittelt, so dass die anfallenden Kosten für Unterhalt und Instandhaltung auf die Laufkilometer umgelegt werden konnten. Dieses Vorgehen wurde auch von Bente u. Roeleveld (2006) durch statistische Analysen plausibilisiert.

Die laufleistungsabhängigen *Kosten für Unterhalt und Instandhaltung der Fahrzeuge* (K_{FZ}) werden auf Basis der Cluster der Referenzfahrzeuge erhoben. Analog zu der in Abschnitt 3.2.3.5 beschriebenen Annahme zur Personaleinsatzzeit beschränkt sich die Erhebung auf die Laufleistungen der reinen Zugfahrten.[171] Jegliche Rangierbewegungen werden vereinfachend ausge-

[168] Das Intervall zwischen zwei Hauptuntersuchungen darf auf bis zu acht Jahre gestreckt werden, wovon in der Regel Gebrauch gemacht wird. Im Ausland gibt es in der Regel vergleichbare größere Untersuchungen in einem vergleichbaren zeitlichen Abstand.

[169] Siehe Abschnitt 3.2.3.7 auf der nächsten Seite.

[170] Das Fahrzeug *NV 600 E (Dosto)* wurde gegenüber der Zusammenstellung bei Birn u. a. (2010, S. 3-39f.) ergänzt, da ein Doppelstocktriebzug mit hoher Kapazität dort nicht enthalten ist. Die Kostensätze wurden auf Basis des Fahrzeugs *NV 300 E* sowie Addition der Differenz zwischen ein- und doppelstöckigen Fahrzeugen festgelegt.

[171] Leerfahrten und Fahrten entgegen der Lastrichtung werden hier berücksichtigt.

Tabelle 3.2.3: Unterhaltungs-/Instandhaltungskosten der Referenzfahrzeugtypen nach Birn u. a. (2010, S. 3-34ff.).

Cluster	Bezeichnung	Traktion	Länge [m]	Kosten Kosten [EUR/Fahrzeugkm]
1	NV 100 E	Elektro	42	0,34
2	NV 150 E	Elektro	58	0,60
3	NV 200 E	Elektro	74	0,82
4	NV 250 E	Elektro	90	0,88
5	NV 300 E	Elektro	106	1,08
6	Lok NV D + 7 Dosto	Diesel	205	3,45
7	Lok NV D + 8 Dosto	Diesel	230	3,84
8	NV 600 E (Dosto)	Elektro	106	1,56

klammert, so dass die reale Laufleistung in den betrachteten Netzen bei nicht ausschließlicher Anwendung von sogenannten Bahnsteigwenden höher liegt als angegeben.

3.2.3.7. Energiekosten

Schienenfahrzeuge benötigen zur Fortbewegung Energie. Bei der Bremsung wird jedoch ebenso Energie freigesetzt, die in Abhängigkeit der Triebfahrzeugbauart und des Stromsystems auch zurückgespeist oder gespeichert und dann genutzt werden kann.[172] Heutzutage sind Elektro- und Dieseltraktion sowie einzelne Hybridvarianten, die beides kombinieren, gebräuchlich. Im Bereich der Elektrotraktion sind verschiedene Stromnetze zu unterscheiden, die historisch gewachsen in den einzelnen Ländern entstanden sind. Die Überwindung der Grenze zwischen unterschiedlichen Stromsystemen stellt mittlerweile keine zu große Hürde da, dennoch überwiegt in Deutschland aufgrund der höheren Bedeutung im Personenverkehr im nationalen Verkehr die Zahl der Einsystemfahrzeuge. Entsprechend berücksichtigen die Daten in Tabelle 3.2.4 dargestellten Werte auch nur Referenzfahrzeuge für ein Energiesystem. Die Unterteilung folgt den zuvor in Tabelle 3.2.3 dargestellten Referenzfahrzeugtypen aus Birn u. a. (2010, S. 3-35ff.,3-40f.). Zur Kalkulation der Kosten für die Traktionsenergie werden dort 0,10 EUR/kWh für den Strom sowie 0,75 EUR/l Diesel angegeben.[173]

Bei McKinsey and Company (2010, S. 23) wird ein Anteil von etwa zehn Prozent genannt, den die Energiekosten an den gesamten Kosten im Personen- und Güterverkehr ausmachen. Für den SPNV nennt Geyer (2014, S. 12) zwölf Prozent. Dasburg (2008, S. 18f.) beziffert den Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten für drei durch Deutschland führende

[172] Vgl. u. a. Hecht (2011); Janicki (2014).

[173] Diese Energiepreise werden in Birn u. a. (2010, S. 3-5) als gemeinwirtschaftlich betrachtet und beinhalten keine Steuern und Abgaben. Baumgartner (2001, S. 15) bestätigt diesen Preis für elektrische Traktion als Mittelwert.

Güterverkehrskorridore sogar auf 22 bis 29 Prozent. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Personalkosten im Schienengüterverkehr (SGV) wegen entfallender Zugbegleitpersonale geringer ausfallen als im Personenverkehr.[174]

Tabelle 3.2.4: Spezifische Traktionsenergiekosten nach Birn u. a. (2010, S. 3-35ff.).

Cluster	Bezeichnung	Traktion	Länge [m]	Kosten [EUR/Fahrzeugkm]
1	NV 100 E	Elektro	42	0,41
2	NV 150 E	Elektro	58	0,53
3	NV 200 E	Elektro	74	0,64
4	NV 250 E	Elektro	90	0,77
5	NV 300 E	Elektro	106	0,91
6	Lok NV D + 7 Dosto	Diesel	205	3,29
7	Lok NV D + 8 Dosto	Diesel	230	3,61
8	NV 600 E (Dosto)	Elektro	106	1,10

Zunehmend von Bedeutung ist bei der Betrachtung der Energiekosten auch die Erstattung von Energie, die beim Bremsen in das Netz zurückgespeist wird. Alle modernen Triebfahrzeuge im Eisenbahnnetz sind in der Lage, beim Bremsen mit den Fahrmotoren Energie in das Netz zurückzuspeisen, so dass diese Energie durch andere Fahrzeuge im Netz genutzt werden kann. (Kirfel u. Recker 2010, S. 7) Die Rückspeisequote wird je nach Bezugsgröße mit acht bis 25 Prozent beziffert.[175] Auch Fassbinder (2011, S. 131) nennt bei ausschließlichem Einsatz von rückspeisefähigen Fahrzeugen einen Durchschnittswert von 20% im Regionalverkehr. Von den ermittelten Energiekosten werden - der Berechnung von Fassbinder folgend - im weiteren Verlauf 20% abgezogen.[176]

Die Kalkulation der Energiekosten muss bei differenzierten Bedienkonzepten, wie sie in den späteren Abschnitten betrachtet werden, berücksichtigen, dass die Haltestrategie und damit die mittleren Stationsabstände angemessen berücksichtigt werden. Denn häufige Anfahr- und Bremsvorgänge erhöhen den Energieverbrauch. Eine Vernachlässigung dieses Aspekts führt zu zu geringen Ansätzen für Energiekosten bei oft haltenden Zügen im Vergleich zu Expressfahrten.[177] Betrachtet man die energieverzehrende Beharrungsfahrt, bei der der Zug aus dem Stillstand bis zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit beschleunigt, in dieser Geschwindigkeit beharrt und spätest möglich bis in den Stillstand bremst, ergibt sich nach Siegmann (2001,

[174] Zu beachten ist bei der Betrachtung ausländischer Kostensätze ferner, dass dort mitunter die Energiekosten in den Trassenentgelten enthalten sind.

[175] Der untere Wert betrifft eher DB Regio mit relativ vielen älteren Elektrolokomotiven ohne Rückspeisefähigkeit. (Kirfel u. Recker 2010, S. 7) Jüngere EVU mit vergleichsweise modernen Flotten aus Elektrotriebzügen, die rückspeisefähig sind, bewegen sich eher im oberen genannten Bereich.

[176] Vernachlässigt wird dabei, dass je nach Infrastrukturbetreiber die zurückgespeiste Energie nicht zu den gleichen Konditionen, in Deutschland in der Vergangenheit nur zu 40 Prozent, erstattet wird, wie zuvor beim Erwerb. (Kirfel u. Recker 2010; Leister 2011a, 2012)

[177] Vgl. dazu auch Meimbresse u. Michalk (2012, S. 15).

S. 29ff.) mit der Gesamtmasse des Zuges (m_{Zug}), der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im betrachteten Abschnitt (v_{max}), dem Massenfaktor des Zuges (ρ), dem Gesamtwiderstand des Zuges (w_{Zug}) sowie den Wegen zum Beschleunigen ($l_{Anfahren}$) und Beharren ($l_{Beharrung}$) der folgende Energiebedarf für einen Stationsabschnitt:

$$E_{ges.b} = 0,5 \cdot m_{Zug} \cdot v_{max}^2 \cdot \rho + \frac{w_{Zug} \cdot m_{Zug} \cdot g}{1000} \cdot (l_{Anfahren} + l_{Beharrung}) \tag{3.2.26}$$

Bei einer energiesparsameren Fahrweise folgt nach dem Anfahren und ggf. einer Beharrungsphase, wie in Abbildung 3.2.7 dargestellt, die Auslaufphase, in der die Leistung abgeschaltet wird und das Fahrzeug rollt. (Gladigau 1992, S. 1362) Durch die geringen Reibungsverluste erfährt der Zug (in der Ebene) nur einen geringen Geschwindigkeitsverlust ($v_{max} - v_e$), durch den je nach Länge der Phase nur wenige Sekunden Fahrzeitverlängerung resultieren. Die Gleichung 3.2.26 zum Gesamtenergiebedarf sieht bei Ersetzung der Beharrungsphase durch die keine zusätzliche Antriebsenergie erfordernde Auslaufphase somit wie folgt aus:

$$E_{ges} = 0,5 \cdot m_{Zug} \cdot v_{max}^2 \cdot \rho + \frac{w_{Zug} \cdot m_{Zug} \cdot g}{1000} \cdot l_{Anfahren} \tag{3.2.27}$$

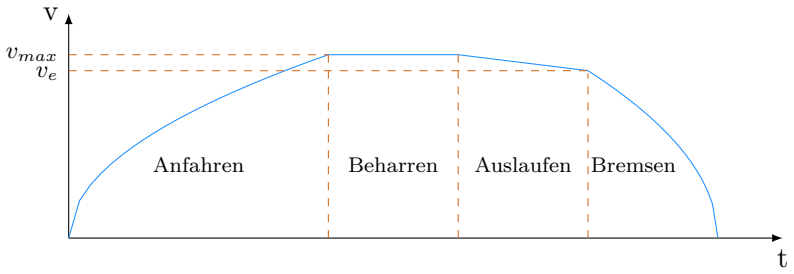

Abbildung 3.2.7: Fahrspiel im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm [eigene Darstellung nach Siegmann (2001, S. 33)].

Fügt man nun Gleichung 3.2.27 noch den beim Bremsen am Ende des Abschnittes entstehenden Gewinn durch Energierückspeisung in das Netz zu, bildet sich der Gesamtenergiebedarf zu:

$$E_{gesR} = E_{ges} - 0,2 \cdot E_{ges} = 0,8 \cdot E_{ges} \tag{3.2.28}$$

Bei einer Strecke mit n Halten, auf der die Distanz zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Stationen stets mindestens so lang ist, dass der Zug seine zulässige Höchstgeschwindigkeit

erreichen kann, dann die Leistung abschaltet und bis zum Beginn der Anhaltephase rollt, beträgt der Gesamtenergiebedarf somit

$$E_{gesR,Halt} = n \cdot E_{gesR} \tag{3.2.29}$$

Damit beträgt die Einsparung zwischen einem haltenden und einem an m Unterwegshalten durchfahrenden Zuges nach Gleichung 3.2.29 unter Vernachlässigung des Streckenprofils[178]:

$$\Delta_{E_{gesR}} = n \cdot E_{gesR} - (n - m) \cdot E_{gesR} = m \cdot E_{gesR} \tag{3.2.30}$$

Durch jeden ausgelassenen Halt kann somit vereinfachend der Energiebedarf eines Beschleunigungsvorganges eingespart werden. Für die zu treffenden Bewertungen erscheint diese grobe Energiebetrachtung hinreichend zu sein. Es werden daher für die weitere Betrachtung folgende Annahmen getroffen:

- Da hier vor allem der Energiebedarf zum Anfahren relevant ist, wird vereinfachend von einer Beschleunigung bis zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit ausgegangen und dazu allein die kinetische Energie verwendet, wie sie im ersten Summanden in Gleichung 3.2.27 dargestellt ist.
- Den Massenfaktor eines Zuges beziffert Siegmann (2001, S. 30) auf 1,06 bis 1,09. Pachl (2013, S. 32) empfiehlt für näherungsweise Rechnungen die Wahl des Wertes 1,08, welche nachfolgend verwendet wird.[179]

In den einzelnen Systemen sind somit als Eingangsgrößen die Masse der Züge sowie die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Bereich der Stationshalte zu erfassen. Zusammen mit der Anzahl der Beschleunigungsvorgänge (nach Stationshalten) auf den einzelnen Strecken ergibt sich damit (sehr grob) der Energiebedarf E_B. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Systemen zu schaffen, wird dieser Wert als $E_{B,Z}$ pro Formationsmeter[180] und Anfahrvorgang nach einem Halt bestimmt, um Unabhängigkeit von der Netzausdehnung, der Zuglänge und

[178] Steigungen und Gefälle verhindern das Auslaufen über längere Abschnitte.
[179] Siegmann nennt für Elektrolokomotiven Werte von 1,1 bis 1,3 sowie für Diesellokomotiven von 1,05 bis 1,2. Aufgrund der größeren Relevanz der Elektrotraktion in den Betrachtungen dieser Arbeit deckt sich dies mit dem von Pachl genannten Wert.
[180] Gemeint ist je ein Meter der Zuglänge l_{Zug}.

der absoluten Zahl der Beschleunigungsvorgänge zu gewährleisten.[181] Als zweiter Wert wird der Energiebedarf pro Abfahrt pro Passagier [182] ermittelt und als $E_{B,S}$ bezeichnet.

$$E_B = 0,5 \cdot m \cdot v_{max}^2 \cdot \rho \tag{3.2.31}$$

$$E_{B,Z} = \frac{E_B}{l_{Zug}} \tag{3.2.32}$$

$$E_{B,S} = \frac{E_B}{N_S} \tag{3.2.33}$$

Als zweite Größe der Energie werden die eigentlichen Energiekosten (K_E) erfasst, wie sie oben in Abhängigkeit der zurückgelegten Strecke dargestellt wurden. Wie zuvor bei der Personaleinsatzzeit und den Unterhalts- und Instandhaltungskosten der Fahrzeuge wird die Energiebetrachtung auf die Zugkilometer beschränkt.[183] Damit könnte dieser Kostenpunkt auch summiert mit den zuvor genannten Fahrzeugkosten dargestellt werden. Zur detaillierteren Darstellung werden die beiden Kostenpunkte jedoch aufgeschlüsselt erhoben.

3.2.3.8. Zwischenfazit: Wirtschaftliche Beschreibung

Die Betrachtung der *Erlöse* sowie der *Kosten* für Fahrten und Halte gehören dem wirtschaftlichen Teil der Beschreibung an.[184] Die Erlöse werden durch die (groben) Fahrterlöse pro Zugkilometer in Verbindung mit der Formationslänge beschrieben. Die Betrachtung der Kosten erfolgt detaillierter durch den Energiebedarf, die Stationshalte sowie die zeitliche und räumliche Länge der Fahrten. Ferner gehört der Anteil an Leerfahrten, durch die direkt keine Erlöse erzielt werden können, zu dieser Untergruppe.

Damit ist ein umfassendes Bild der wirtschaftlichen Aspekte der zu beschreibenden Systeme gegeben.

---

[181] Abweichend von den Ausführungen in Kapitel 3.2.3.6 auf Seite 61 zu den verwendeten Referenzfahrzeugen wird an dieser Stelle mit der Masse der tatsächlich eingesetzten Fahrzeuge in den einzelnen Netzen gerechnet, um den sehr unterschiedlichen Masseverhältnissen Rechnung zu tragen. Entsprechend wird auch die reale Zuglänge zur Division verwendet. Birn u. a. (2010, S. 3-34ff.) nennen keine Masse für die Referenzfahrzeuge.

[182] Es gilt auch hier die Festlegung aus Kapitel 3.2.1.1 auf Seite 19, dass nur die Sitzplätze N_S der Formation betrachtet werden. Ferner wird auch dieser Wert bezogen auf die realen Fahrzeuge ermittelt.

[183] Dabei werden neben den im Fokus stehenden Fahrten in Lastrichtung auch Fahrten entgegen der Lastrichtung als auch Leerfahrten beachtet.

[184] Vgl. Aufschlüsselung in Tabelle 3.2.5.

Tabelle 3.2.5: Wirtschaftliche Vergleichskriterien für die einzelnen vorgestellten Systeme.

Gruppe	Name	Bezeichnung
Erlöse	Fahrterlöse [EUR/Zugkm]	E
	Formationslänge [m]	l_{Zug}
Kosten	Anteil haltender Züge pro Station [%]	η_{DH}
	Energiebedarf pro Abfahrt und Sitzplatz [kJ/Platz]	$E_{B,S}$
	Energiebedarf pro Abfahrt und Zuglängenmeter [kJ/m]	$E_{B,Z}$
	Fahrtdauer (Last- und Gegenrichtung HVZ) [Min.]	t_{Fahrt}
	Fahrtdauer (Gegenrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,G}$
	Fahrtlänge (Last- und Gegenrichtung HVZ) [km]	l_{Fahrt}
	Fahrtlänge (Gegenrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,G}$
	Fahrtlänge (Lastrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,L}$
	Fahrtdauer (Lastrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,L}$
	Fahrzeugunterhalt und -instandhaltung [EUR/km]	K_{FZ}
	Energiekosten [EUR/km]	K_E
	Quotient der Leerfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,GL}$

3.3. Zusammenfassung und Darstellung der Vergleichskriterien

Mit den in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Kriterien lassen sich nachfolgend die einzelnen, zum Teil sehr unterschiedlichen Systeme derart beschreiben, dass eine Vergleichbarkeit möglich ist. Dabei sind die vorgestellten Systeme so gewählt, dass sie sich jeweils in mindestens einem Parameter unterscheiden.

3.3.1. Ermittlung und Skalierung der Vergleichskriterien

Die in den drei Bereichen *Verkehr*, *Betrieb* und *Wirtschaftlichkeit* erarbeiteten Beschreibungsparameter erfassen weite Teile der beschriebenen Systeme. Da vor allem Aussagen zu den Gesamtsystemen relevant sind, basiert der Vergleich über die einzelnen Systeme vor allem auf dem Median der erhobenen Werte pro Netz. Dieser bietet im Gegensatz zum arithmetischen Mittel den Vorteil, dass einzelne herausfallende Extremwerte der erfassten Daten zu einem, nicht die Realität widerspiegelnden Vergleichswert liefern. Der Median zeigt den *Schwerpunkt* der jeweiligen Daten.

Daneben werden bei den Quotienten, den quantitativen Kriterien sowie den Reisezeitgewinnen werden auch jeweils die Minima und Maxima ermittelt sowie das obere und untere Quartil der Werte benannt, wodurch weitere vergleichende Aussagen möglich sind.

Der im Abschnitt 3.1 gewählten Beschreibungsmethodik in Anlehnung an eine NWA folgend, müssen die zu berücksichtigenden Kriterien skaliert werden. Die Skalierung erfolgt basierend auf den Werten der vorzustellenden Systeme in Kapitel 4 mit Punkten von eins bis zehn. Dabei erstreckt sich die Skala von einem Punkt für das Minimum des jeweiligen Wertes über alle Vergleichssysteme bis zu zehn Punkten für das jeweilige Maximum. Jedes System bekommt den (auf Ganzzahlen gerundeten) Punktwert, der dem Median des jeweiligen Kriteriums entspricht.

Zur Vergleichbarkeit wird bei jedem Parameter der Minimalwert über alle betrachteten Netze mit null sowie der Maximalwert mit zehn Punkten definiert. Jedes System bekommt entsprechend seines Medians auf dieser Skala den entsprechenden Punktwert pro Parameter, so dass jeweils erkennbar ist, inwieweit der betreffende Parameter bei diesem System eher minimal, maximal oder im Mittelfeld liegt. Die Punkte sind nicht als *schlecht* oder *gut* wie bei Schulnoten zu übersetzen, sondern drücken vielmehr *keine bzw. geringe Ausprägung* (null Punkte) bis *besonders starke Ausprägung* (zehn Punkte) aus.[185]

[185] Bei einzelnen Parametern ist hier jeweils der Kontext zu beachten, in dem der Parameter behandelt wird. Ein Beispiel aus Abschnitt 3.2.3.3: Das Verhältnis haltender zu durchfahrenden Zügen hätte aus betrieblicher Perspektive eine geringe Differenzierung mit null Punkten für den Fall, dass keine Zwischenhalte ausgelassen werden und zehn Punkten für große Differenzierung. Der Parameter wird jedoch im wirtschaft-

Unter dem Blickwinkel dieser Vergleichskriterien werden in Kapitel 4 sieben ausgewählte Verkehrsnetze betrachtet und beschrieben.

3.3.2. Darstellung der Vergleichskriterien

Nachfolgend wird an einem Beispiel erläutert, mit welchen Darstellungsformen die zuvor zusammengefassten Vergleichskriterien aufbereitet und dargestellt werden.

Das Beispiel verwendet fiktive Daten des in Abbildung 3.3.1 dargestellten Schienennetzes der Insel Lummerland.[186] Die hier und in den Beschreibungen der einzelnen Netze verwendeten Liniennetzpläne sind schematisch, nach Norden ausgerichtet, jedoch nicht maßstäblich und sollen lediglich der groben Orientierung dienen. Fett dargestellte Stationen sind Zwischen- oder Endstationen. Die zentralen Orte[187] sind in den Netzplänen mit schwarzem Rand und weißer Fläche markiert. In Lummerland ist dies der Bahnhof Lummerland Hauptbahnhof (Hbf).

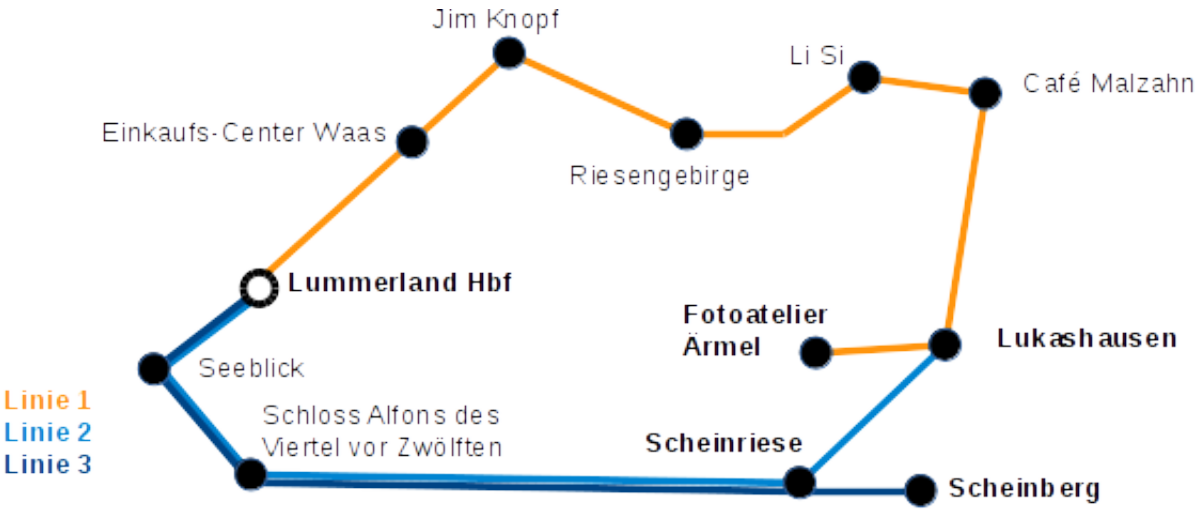

Abbildung 3.3.1: Liniennetzplan des Beispiels Lummerland [eigene Darstellung nach o.A. (2000, S. 2) und Ende (1970)].

Drei Polardiagramme wie in Abbildung 3.3.2 stellen zu jedem Netz die Ausprägungen in den drei Bereichen *Verkehr*, *Betrieb* und *Wirtschaftlichkeit* dar. Dabei werden die zuvor beschriebenen Punkteskalen verwendet, wodurch bei jedem Netz bereits in dieser Darstellung erkennbar ist, wie stark ausgeprägt die einzelnen Aspekte dieses Netzes im Vergleich mit den anderen Netzen sind. Dabei stehen null Punkte, wie zuvor beschrieben, für das Minimum aller Netze

lichen Kontext behandelt und dort ist *überall halten* aufgrund der Stationsgebühren teurer und eine stärkere Ausprägung und wird daher mit zehn Punkten belegt.

[186] Das Beispiel ist angelehnt an die erläuternde Grafik in o.A. (2000, S. 2), wo man sich bereits der Insel aus dem Kinderbuch von Ende (1970) als Datengrundlage bedient hat.

[187] Vergleiche Definition dazu in Abschnitt 3.2.

und zehn Punkte für das Maximum. Sortiert sind die einzelnen Parameter innerhalb jedes Diagramms nach den in den Tabellen 3.2.2 bis 3.2.5 genannten Gruppen. Diagramme mit vielen weit außen liegenden Werten zeugen von einer vergleichsweise großen Differenzierung in einem Netz. Der mit einem Quadrat in der blassesten Farbe markierte Wert steht für das Maximum des betreffenden Aspektes in dem jeweiligen Netz. Das Dreieck in der dunkelsten Farbe markiert entsprechend das Minimum. Der Kreis in der dazwischen liegenden Farbschattierung kennzeichnet den Median des Netzes. Zur besseren Erkennbarkeit sind die Flächen ausgehend vom Zentrum des Diagramms in der jeweiligen Farbe ausgefüllt. Sind auf einer Ausprägung keine drei Punkte sichtbar, überlagern sich Minimum, Median oder Maximum.

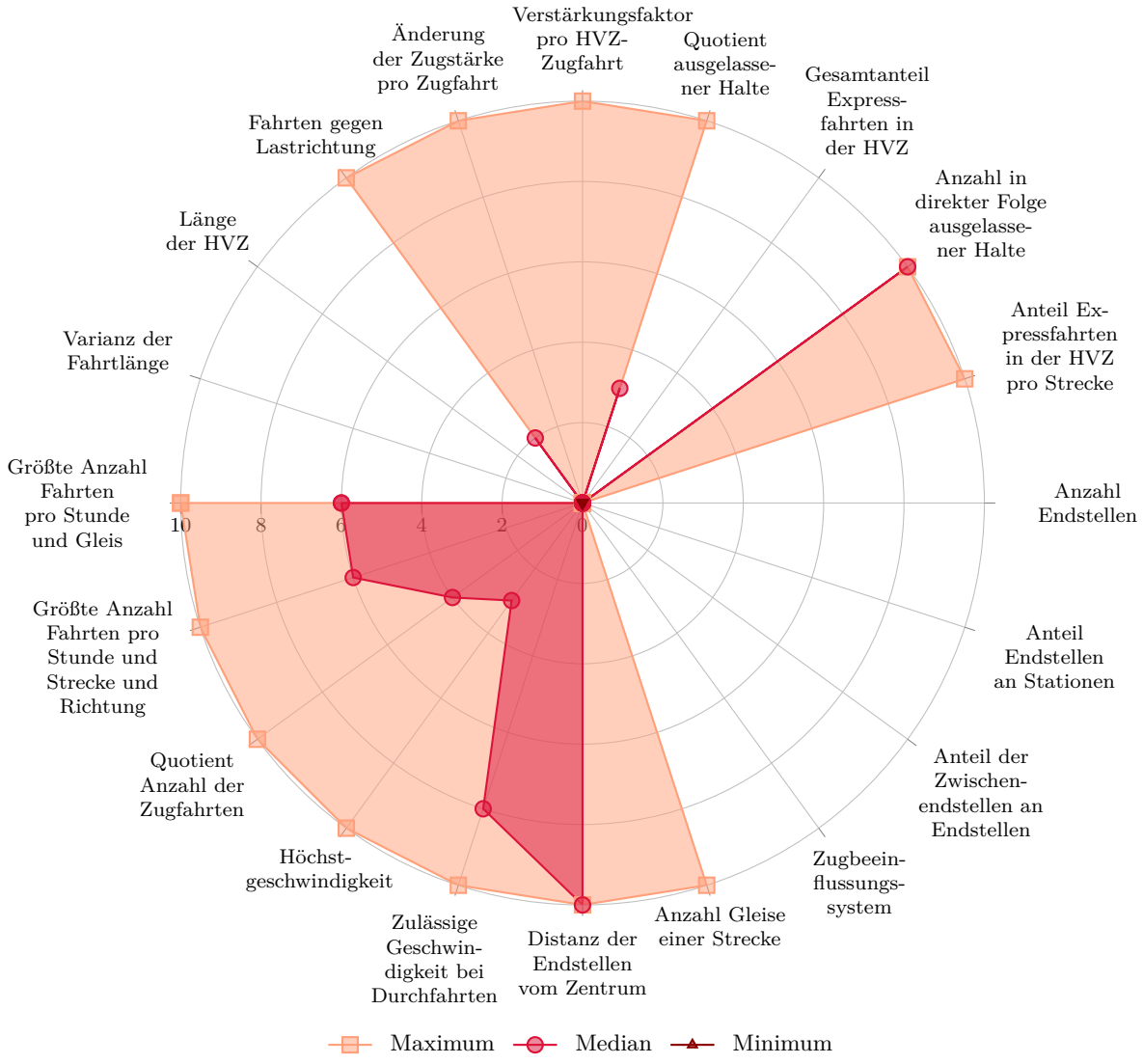

Abbildung 3.3.2: Betriebliche Vergleichsparameter des Beispiels Lummerland.

Mit Balkendiagrammen werden die Varianzen der Abfahrtsabstände und des Platzangebotes getrennt nach Streckenästen in den Netzen dargestellt. Ein Beispiel zeigt Abbildung 3.3.3. Dabei beziehen sich die Daten je nach dargestelltem Parameter entweder auf die jeweils genannte Station bzw. auf den Streckenabschnitt von der genannten Station zur nachfolgenden Station. Der letzte Eintrag[188] nennt neben der Anfangsstation des Abschnitts auch die Station am Ende.

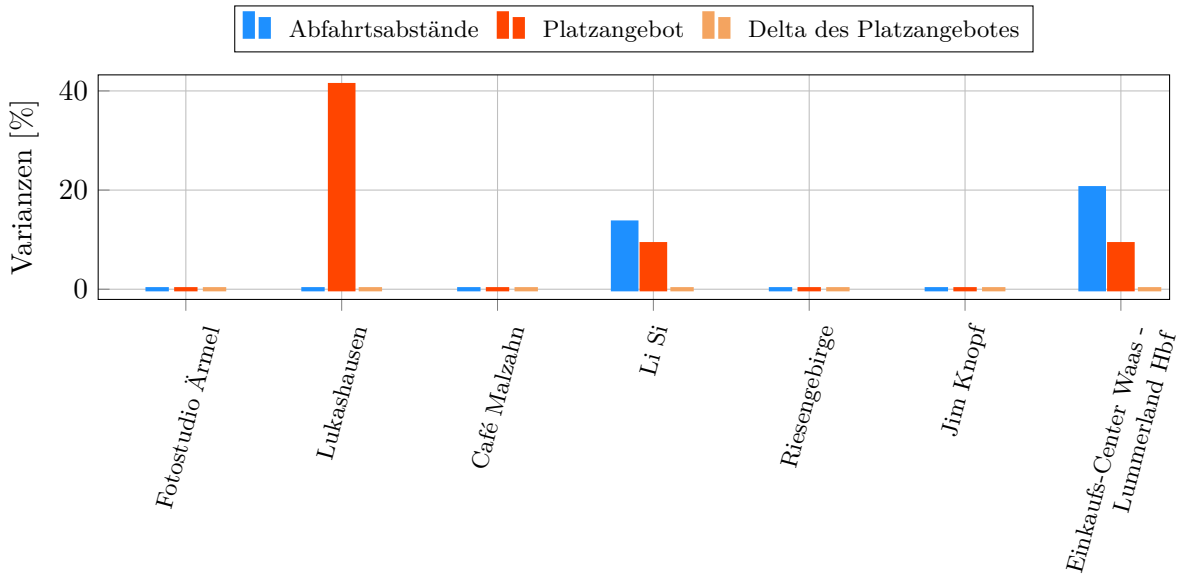

Abbildung 3.3.3: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast des Beispielnetzes von Fotoatelier Ärmel nach Lummerland Hbf.

Zusammenstellungen von Daten wie beispielhaft in Tabelle 3.3.1 zu den Reisezeitgewinnen werden dort eingesetzt, wo Unterschiede über verschiedene Teile eines Netzes mit mehreren Aspekten gemeinsam dargestellt werden sollen.[189]

Die Quotienten entlang der Streckenäste werden wie in Abbildung 3.3.4 in Balkendiagrammen je Ast dargestellt. Dabei werden zur gemeinsamen Darstellung der vier Quotienten jeweils die Werte, die sich auf eine Station anstelle der im Diagramm dargestellten Strecken beziehen, an der Anfangsstation der jeweiligen Strecke ausgegeben.[190] In den Analysen der einzelnen Netze werden jeweils nur ausgewählte Streckenäste gezeigt. Sämtliche derartigen Diagramme sind im

[188] In diesen Darstellungen ist das entsprechend am rechten Rand.

[189] Im konkreten Beispiel der Reisezeitgewinne ist zu beachten, dass jeweils nur gleichartige Daten zusammengefasst werden. Da hier die Tabelle nach Abschnitten mit ausgelassenen Halten aufgebaut ist, kann es mehrere Zeilen pro Abschnitt geben, wenn dieser von Fahrten mit unterschiedlichen Anfangs- oder Endbahnhöfen befahren wird.

[190] Der für den Abschnitt Lukashausen - Café Malzahn in Abbildung 3.3.5 gezeigte Quotient der Stationshalte bezieht sich somit auf die Station Lukashausen.

Tabelle 3.3.1: Reisezeitgewinne im Beispielnetz Lummerland.

Anzahl Fahrten	Abschnitt	t (m. Halt)	t (o. Halt)	Δ Halte	$\Delta t_{R,abs}$	η_D
2	Lukashausen - Einkaufs-Center Waas	10	7	3	3	0.43
2	Lukashausen - Einkaufs-Center Waas	10	7	3	3	0.5
5	Scheinriese - Lummerland Hbf	9	7	2	2	0.5
1	Scheinriese - Lummerland Hbf	9	7	2	2	0.67

Anhang A zu finden. Ein Diagramm pro Netz wie in Abbildung 3.3.5 zeigt die ermittelten Quotienten in Abhängigkeit der Entfernung zu den zentralen Punkten des Netzes.[191]

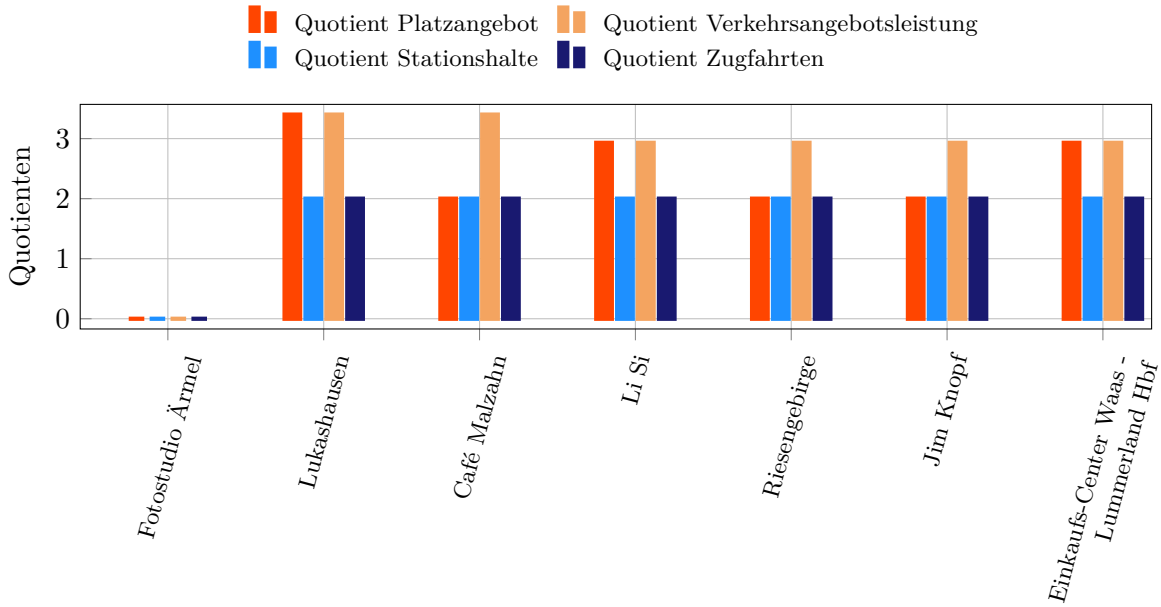

Abbildung 3.3.4: Quotienten für die Beispielstrecke Lukashausen - Lummerland Hbf.

Die Darstellung wie in Tabelle 3.3.2 wird eingesetzt, um die einzelnen Parameter der drei Bereiche des jeweiligen Netzes mit ihren exakten Minima, Maxima und Medianen aufzuführen.

Im Anschluss an die Beschreibungen in Kapitel 4 werden in der Klassifizierung in Kapitel 5 weitere Diagramme zum Vergleich verwendet. In diesen Boxplots, beispielhaft sind in Abbil-

[191] In diesen Diagrammen könnte man eine (Regressions-)Linie erwarten, die mit einer geeigneten Fitting-Funktion die Aussagekraft der Darstellungen erhöht. Aufgrund der Mischung unterschiedlicher Streckenäste in den Diagrammen bräuchte es abschnittsweise Definitionen. Bei genauer Betrachtung der Diagramme erkennt man diese Muster nach Streckenästen bzw. Streckenabschnitten. Da zudem die in Abschnitt 3.2 an verschiedenen Stellen eingeführten Quotienten gemäß der getroffenen Definition 0 ergeben können, helfen Fitting-Funktionen zur Verdeutlichung der Daten nicht weiter.

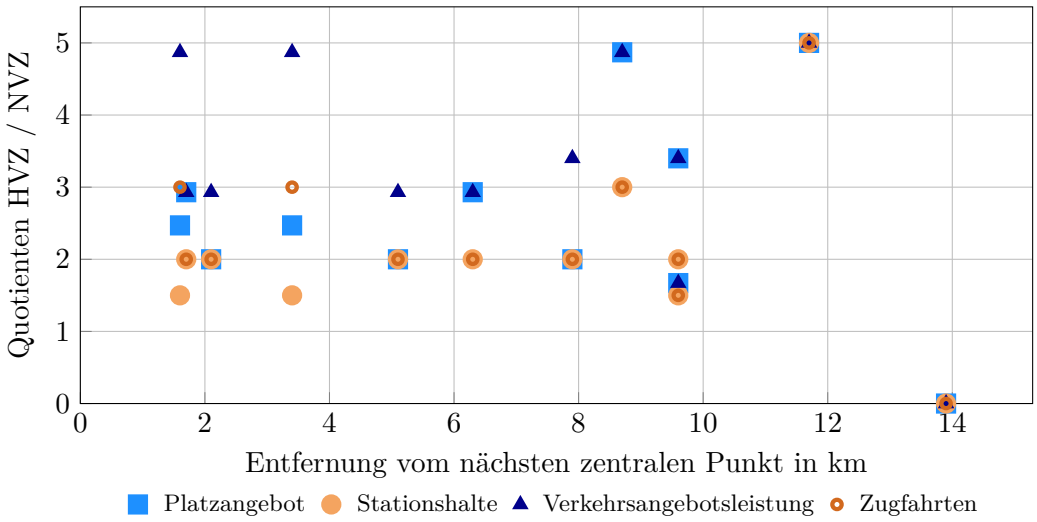

Abbildung 3.3.5: Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten auf der Insel Lummerland.

dung 3.3.6 einige Quotienten aus Lummerland dargestellt, werden jeweils das Minimum, das Maximum sowie dazwischen durch einen Kasten der Bereich zwischen dem unteren und dem oberen Quartil hervorgehoben. Der Median wird mit einer gestrichelten roten Linie markiert.

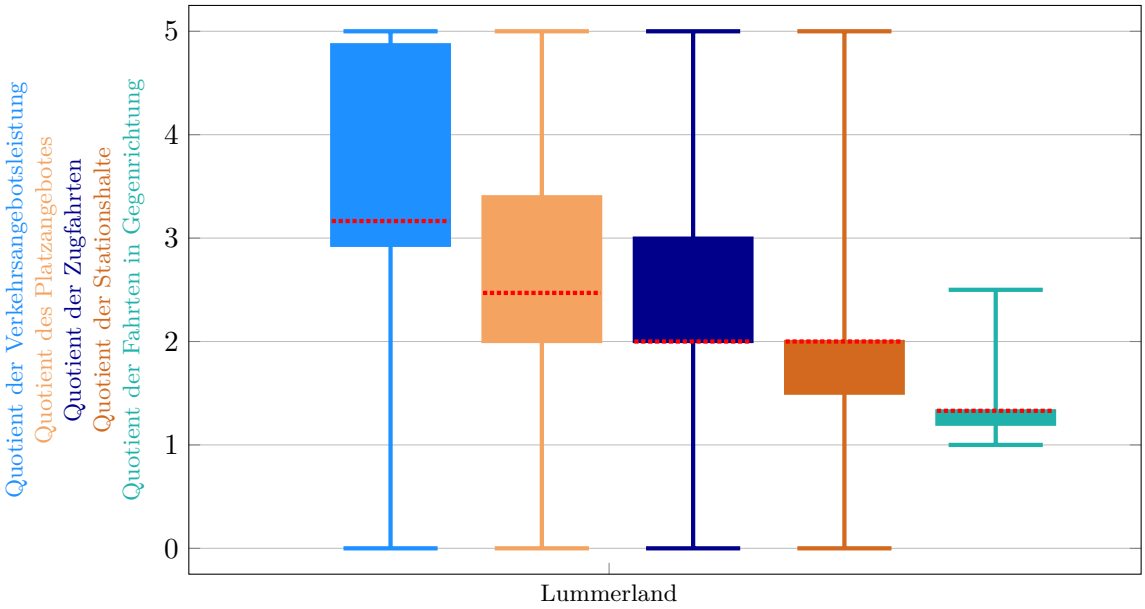

Abbildung 3.3.6: Beispielhafte Zusammenfassung der zusammengestellten Vergleichsquotienten zu Platzangebot, Zugfahrten und Stationshalten auf der Insel Lummerland.

Tabelle 3.3.2: Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für das Beispielnetz der Insel Lummerland.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde und Gleis [pro h und Gleis]	$N_{ZZ,G,max}$	2	8	12
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde, Strecke und Richtung [pro h und Richtung]	$N_{ZZ,S,max}$	1	4	6
Quotient Anzahl der Zugfahrten	η_F	0	2	5
Anzahl Gleise einer Strecke	N_G	1	1	2
Distanz der Endstellen vom Zentrum [km]	l_N	11,70	13,90	13,90
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	v_{max}	60	80	120
Zugbeeinflussungssystem	ZUB		1	
Zulässige Geschwindigkeit bei planmäßigen Durchfahrten [km/h]	$v_{max,D}$	80	95	100
Änderung der Zugstärke pro Zugfahrt	N_{ZH}	0	0	1
Anteil der Zwischenendstellen an Endstellen [%]	η_{ZE}		50,00	
Anteil Endstellen an Stationen [%]	η_E		33,33	
Anteil Expressfahrten in der HVZ pro Strecke [%]	$\eta_{Ex,S}$	0,00	0,00	50,00
Anzahl Endstellen	N_E		4	
Anzahl in direkter Folge ausgelassener Halte	N_D	1	2	2
Quotient Zugfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,G}$	1	1	3
Gesamtanteil Expressfahrten in der HVZ [%]	η_{Ex}		50,00	
Länge der HVZ [h]	t_{HVZ}		2	
Quotient ausgelassener Halte	η_D	0,43	0,50	0,67
Varianz der Fahrtlänge [%]	ν_N		12,51	
Verstärkungsfaktor pro HVZ-Zugfahrt	l_{ZH}	1	1	3

4. Analyse von Verdichtungsprinzipien in ausgewählten Schnellbahnnetzen

In diesem Arbeitsschritt werden verschiedene nationale und internationale Netze mit unterschiedlichen Methoden zur Abfederung zeitlicher und räumlicher Aufkommensspitzen den in Kapitel 3 erarbeiteten Kriterien folgend beschrieben.[192]

Betrachtet und analysiert werden ausgewählte Verkehrsnetze aus dem (erweiterten) Bereich der Stadtschnellbahnen, die sich alle in mehreren der gewählten Vergleichskriterien unterscheiden. Damit ist jedes Netz für sich betrachtet einzigartig.

Die Beschreibung beschränkt sich auf sieben Systeme und erhebt damit nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, jedoch auf Abdeckung der beispielhaften Systeme mit unterschiedlichsten Ausprägungen. Die Auswahl erfolgte derart, dass redundante Systeme[193] ausgelassen wurden und eine Vielfalt an Ausprägungen vorhanden ist. Allen Systemen ist gemein, dass sie mehr oder weniger stark Expresszüge einsetzen. Als Gegenpol und Vergleichsreferenz wird die S-Bahn Berlin betrachtet, wo es derzeit keinerlei Expressfahrten gibt. Ein weiterer Aspekt der Auswahl ist die Datenverfügbarkeit, die bei den gewählten Systemen im Gegensatz zu weiteren ähnlichen Systemen in hinreichendem Maß durch öffentlich zugängliche Quellen oder Unterstützung durch die Unternehmen gegeben ist.[194]

Das siebte untersuchte Netz ist ein Exot und nicht als klassisches Stadtschnellbahnnetz zu betrachten: Caltrain in San Francisco dient als Beispiel für eine einzelne Strecke ohne jegliche Netzbildung mit starker Ausrichtung auf den Linienendpunkt.[195] In der Klassifizierung wird dieses System herangezogen, um zu evaluieren, inwieweit einzelne Strecken ohne Netzbildung die Beschreibungsskala verzerren oder ob die Erkenntnisse ebensolche Aussagekraft haben wie in *richtigen* Netzen.[196]

---

192 Eine vergleichende Betrachtung folgt im anschließenden Kapitel 5 auf Seite 174.
193 Die S-Bahn Hamburg ist beispielsweise der S-Bahn Berlin ähnlich. Die S-Bahn Rhein/Main hat vergleichbare Charakteristika wie die S-Bahn München.
194 Die verwendeten Datenquellen werden jeweils in den nachfolgenden Abschnitten benannt.
195 Siehe Analyse in Abschnitt 4.7 auf Seite 162.
196 Siehe Abschnitt 5.4.1 auf Seite 213.

Explizit nicht betrachtet werden hier jedoch Angebotsverdichtungen durch nahezu vollständig losgelöst vom normalen Linienverlauf geführte Verstärkungslinien, wie sie im Fernverkehr oder auch im Schülerverkehr mit Bussen häufig zum Einsatz kommen.[197] Wenngleich dies auch im Stadtschnellbahnverkehr grundsätzlich - entsprechende alternative Strecken vorausgesetzt[198] - möglich ist, so würde es die Aussagekraft einiger der ermittelten Beschreibungsparameter verzerren. Ferner werden nur Konzepte vorgestellt, die in dieser Form auch tatsächlich betrieben werden oder betrieben wurden.[199] Nicht realisierte Studien wie jene von Hörstel u. a. (1993a) zu Expresszugsystemen im Hamburger U-Bahn-Netz oder noch nicht umgesetzte Planungen der S-Bahn 2G Zürich (Brühwiler u. a. 2015, S. 286) werden mangels Betriebserfahrungen und verfügbarer Unterlagen nicht näher betrachtet.

Die den Betrachtungen in den nachfolgenden Abschnitten zugrunde liegenden Tabellen sowie die die Ergebnisse über alle Strecken eines Netzes zusammenfassenden Diagramme sind, soweit nicht in den Text eingebunden, im Anhang A zu finden. Eine Erläuterung der verwendeten Darstellungstypen ist in Abschnitt 3.3.2 auf Seite 70 zu finden.

4.1. S-Bahn Berlin

Die Stadt Berlin ist für sich betrachtet ein polyzentrischer Ballungsraum mit mehreren historisch gewachsenen Teilzentren, so dass die Reisenden im ÖPNV in der HVZ nicht ein spezielles Stadtviertel als Hauptziel ansteuern, sondern sich weitgehend auf die gesamte Stadt verteilen. Auf den in das innerhalb der Ringbahn liegende Innenstadtgebiet führenden Radialen gibt es jedoch deutliche auf das Zentrum gerichtete Fahrgastströme in der HVZ. Diese erstreckt sich morgens linienweise über etwa dreieinhalb Stunden.[200]

Die Berliner S-Bahn verkehrt auf einem 332 km umfassenden Streckennetz[201] mit Gleichstrom aus einer seitlichen Stromschiene und hat dementsprechend eine vom restlichen Eisenbahnnetz

[197] Als Beispiel sei an dieser Stelle auf die Linien im Schülerverkehr in der Stadt Lünen (Kreis Unna) verwiesen. Diese verbinden direkt Stadtteile, die im normalen Linienverkehr nur mit einem Umweg (und Umstieg) über das Stadtzentrum verbunden sind.

[198] Ein Beispiel wäre der seit Jahren in der Diskussion stehende *CDG-Express* zum Flughafen Roissy Charles-de-Gaulle bei Paris. Dieser würde auf weitgehend neuer Infrastruktur zum Flughafen führen - zum Teil weitab der heutigen direkten Strecke. (Gerondeau 2003, S. 101ff.); (o.A. 2006); (o.A. 2005).

[199] Während der Erarbeitung dieser Arbeit wurde in Berlin, Helsinki und Paris das Betriebskonzept auf einzelnen Linien bzw. -abschnitten modifiziert. An den betreffenden Stellen wird auf die Abweichungen zum heutigen Zustand hingewiesen.

[200] Je nach Linie ergeben sich Zeitspannen von zweieinviertel Stunden bis vier Stunden.

[201] Siehe schematische Darstellung in Abbildung 4.1.1.

Abbildung 4.1.1: Liniennetzplan der S-Bahn Berlin.

weitgehend unabhängige Infrastruktur.[202] Diese ist bis heute zu einem großen Teil mit dem als historisch zu bezeichnenden mechanischen Streckenanschlag und der fahrzeugseitigen Fahrsperre als Zugbeeinflussung ausgerüstet. Die Strecken werden seit einigen Jahren schrittweise auf das neue Zugbeeinflussungssystem S-Bahn Berlin (ZBS) umgerüstet.[203]

Im Berliner Stadtgebiet sind fast alle Strecken zweigleisig ausgebaut.[204] Auf zahlreichen Außenästen ist die der S-Bahn zur Verfügung stehende Infrastruktur nur eingleisig. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt auf allen in den letzten Jahren grunderneuerten Strecken weit-

202 An einzelnen Stellen im Netz gibt es Bahnhofsgleise, die gemeinsam mit dem restlichen Eisenbahnverkehr genutzt werden können. Beispiele sind in Birkenwerder und Berlin-Karow (gemeinsam mit dem Regionalverkehr genutzte Bahnsteigkanten) sowie Königs Wusterhausen (kreuzende Fahrstraßen im Bereich der Bahnhofseinfahrt). Vgl. auch Pohlmann (2012, S. 9). Einzelne Abschnitte wie z. B. der Abschnitt Strausberg - Strausberg Nord am Ende der S5 gelten als sogenannte Gemeinschaftsstrecken. Die Zahl der Nicht-S-Bahn-Züge auf diesen Abschnitten ist jedoch vernachlässigbar.

203 Das ZBS wurde eigens für die Berliner S-Bahn auf Basis der technischen Komponenten des European Train Control System (ETCS) entwickelt. Vgl. dazu Apel u. Hornemann (2011) und Lüscher (2014).

204 Ausnahmen sind die Strecken Schönholz - Hennigsdorf, die kurze Strecke Schöneweide - Spindlersfeld sowie mehrere die Landesgrenze überquerende Abschnitte, bei denen ab dem letzten Bahnhof im Land Berlin die Strecke eingleisig ist.

gehend 100 km/h.[205] Der Median über alle Abschnitte liegt bei 80 km/h, das Minimum auf einzelnen Abschnitten bei 40 km/h.

Tabelle 4.1.1: Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in Berlin.

Bezeichnung	Sitzplätze	Traktion	Masse [t]	V_{max} [km/h]	Länge [m]	Cluster Referenzfahrzeuge
481 (Halbzug)	188	Elektro	118	100	74	NV 100 E (1), NV 100 E (1)
481 (Dreiviertelzug)	282	Elektro	177	100	110	NV 100 E (1), NV 100 E (1), NV 100 E (1)
481 (Vollzug)	376	Elektro	236	100	147	NV 100 E (1), NV 100 E (1), NV 100 E (1), NV 100 E (1)

Das Netz gliedert sich in die drei Teilnetze *Nord-Süd* mit dem die Innenstadt durchquerenden Nord-Süd-Tunnel, *Ost-West* mit der die Innenstadt durchquerenden *Stadtbahn*[206] sowie der *Ringbahn* inklusive ihrer Zuglaufstrecken. Alle drei Teilnetze haben jeweils eigene Stammstrecken. Die *Nord-Süd-* und die *Ost-West*-Achse kreuzen sich am Bahnhof Friedrichstraße. Die *Ringbahn* kreuzt die beiden anderen Stammstrecken an den Bahnhöfen Gesundbrunnen im Norden und Schöneberg bzw. Südkreuz[207] sowie West- und Ostkreuz. Die dichteste Zugfolge ergibt sich planmäßig auf der Stadtbahn mit 24 Zügen pro Stunde und Gleis[208] sowie auf der Ringbahn[209] und dem Nord-Süd-Tunnel[210] mit jeweils 21 Zügen pro Stunde und Richtung in der morgendlichen HVZ.[211]

[205] Die derzeit eingesetzten Baureihen 480, 481 und 485 hatten in der Vergangenheit auch Zulassungen für diese Höchstgeschwindigkeit, dürfen jedoch derzeit nur mit maximal 80 km/h verkehren. (Köttel 2011, S. 51). Tabelle 4.1.1 zeigt die eingesetzten Formationen und zugeordneten Referenzfahrzeugcluster.

[206] Vgl. von Röll (1912), Götz u. a. (1968, S. 33) und d'Alençon (2011, S. 92).

[207] Die Nord-Süd-Achse teilt sich bereits innerhalb des S-Bahn-Rings am Anhalter Bahnhof.

[208] Abschnitt Ostkreuz - Ostbahnhof auf den Gleisen von Lichtenberg. Betrachtet man alle vier parallel verlaufenden S-Bahn-Gleise, sind es 33 Züge pro Stunde und Richtung.

[209] Abschnitt Neukölln - Hermannstraße.

[210] Abschnitt Potsdamer Platz - Anhalter Bahnhof.

[211] Alle Ausführungen zu Netz und Fahrplan der Berliner S-Bahn beziehen sich, wenn nicht explizit anderes genannt wird, auf den geplanten, vom Aufgabenträger bestellten Verkehr im Jahresfahrplan 2009 aus o.A. (2008b). Angebotsreduktionen aufgrund von Fahrzeugmangel finden keine Berücksichtigung. Vgl. dazu u. a. Köttel (2011, S. 44ff.) und Felder u. Weirauch (2012, S. 10ff.).

Von Betriebsbeginn bis Betriebsende bietet die S-Bahn Berlin GmbH mit derzeit 15 Linien auf allen Strecken ein Grundangebot im 20-Minuten-Takt. Abweichungen davon gibt es nur im durchgehenden Nachtverkehr sowie auf einzelnen Außenabschnitten im Land Brandenburg. Ergänzt wird das Angebot im Land Berlin von den frühen Morgenstunden bis etwa 21 Uhr durch die sogenannten Tageszuggruppen zu einem 10-Minuten-Takt.[212] Die Linien haben eine Länge zwischen 10,15 km (S47) und 51,85 km (S1).[213] Bezogen auf die gewählten zentralen Punkte[214] ergibt sich ein Median der Fahrtlänge von 18,15 km in Lastrichtung.[215]

Auf dem Ostast der S5 nach Strausberg Nord gibt es mit drei die meisten Zwischenendstellen.[216] Auf den Streckenästen nach Ahrensfelde und Wartenberg gibt es keine Zwischenendstellen. Über alle Streckenäste betrachtet beträgt der Anteil von Zwischenendstellen an Endstellen 0,64.[217]

In den morgendlichen und nachmittäglichen HVZ erfolgt auf einigen Streckenabschnitten eine weitere Verdichtung zu einem 5-/10-Minuten-Takt bzw. zu einem 5-Minuten-Takt. Der sich ergebende Rhythmus gemäß Kapitel 3.2.1.3 ist auf den meisten Linien gleichmäßig, was jedoch vor allem dem Umstand geschuldet ist, dass es im eigentlichen Sinne keine Verdichtung des Zugangebotes gibt und das Grundangebot gleichmäßig ist. Auf den wenigen verdichteten Linien erfolgt dies entweder gleichmäßig oder ungleichmäßig,[218] indem innerhalb von 20 Minuten drei Fahrten im Abstand von fünf Minuten verkehren und dann eine Lücke von zehn Minuten folgt. Die Verstärkerfahrten der S1, S3 und S5 verkehren nicht nur in Lastrichtung. Auf der Ringbahn wird in beide Richtungen verdichtet - hier ist jedoch aufgrund der Linienstruktur keine durchgehende Lastrichtung vorhanden.

[212] Vgl. o.A. (2010a, Anlage 1.6). Ausnahmen im Land Brandenburg seien hier vernachlässigt.

[213] Das errechnete und in Tabelle 4.1.4 dargestellte Maximum von 73,94 km resultiert aus den Fahrten der Ringbahn, die zwar betrieblich nach einer Runde die Zugnummer wechseln und damit als neue Zugfahrt gelten, jedoch im eigentlichen Sinne keine Wendezeit haben und damit in der Betriebsdurchführung wie sehr lange Fahrten wirken. Daher wurden die Fahrten der Ringbahn für die gesamte HVZ jeweils als eine sehr lange Fahrt mit mehreren Ringumrundungen erfasst.

[214] Der zentrale Punkt für die Nord-Süd- und Ost-West-Linien ist der Bahnhof Friedrichstraße. Für die Ringbahn sowie die zu diesem Netz gehörenden Linien S45 bis S47, S8, S85 und S9 sind es die Bahnhöfe Ostkreuz und Südkreuz.

[215] Eigene Berechnung auf Basis von o.A. (2008c).

[216] Abweichend von der eingangs gemachten Prämisse wird auf der östlichen S5 der Infrastrukturzustand und Fahrplan des Jahres 2016 berücksichtigt, in dem die Kreuzungsmöglichkeit zwischen Strausberg und Hegermühle in Betrieb gegangen ist und ein 20-Minuten-Takt in der HVZ bis Strausberg Nord angeboten wird.

[217] Es gibt 25 Zwischenendstellen bei 39 Endstellen insgesamt. In der Ermittlung wurden Endstellen der sich überlagernder Linien jeweils gemeinsam betrachtet. Beispiel: Die südlichen Endstellen der S8 (Zeuthen) und S85 (Grünau) sind auf der S46 (Königs Wusterhausen) Zwischenendstellen. Die Endstellen der S45, S46 und S47 auf der Ringbahn wurden auf der Ringbahn als Zwischenendstellen gezählt.

[218] Die Ringbahnlinien S41 und S42 und die Linie S5 verkehren verdichtet gleichmäßig alle fünf Minuten. Die Linien S1 und S3 verkehren ungleichmäßig im 5/10-Minuten-Takt.

Mit der Erhöhung des Fahrtenangebotes geht jedoch meist keine proportionale Erhöhung des Platzangebotes einher. Überwiegend werden die Verstärkerzüge mit kürzeren Zügen gefahren.[219] Dies hat zur Folge, dass sich auf den betroffenen Strecken Züge mit unterschiedlichen Zuglängen und Platzangeboten abwechseln. Entsprechend zeigt sich bei der Verteilung des Platzangebotes ein breiteres Spektrum, da auf mehreren Linien auch die Tageszuggruppe nicht mit der vollen Zugstärke verkehrt und die HVZ-Verstärker (abgesehen von der Ringbahn) stets nur Halbzüge sind, die die halbe Kapazität der Stammzüge bieten.

Die ungleiche Verdichtung wird nachfolgend am Beispiel des nördlichen Astes der Linie S1 erläutert, die sich teilweise mit anderen Linien überlagert. Auf dem Abschnitt Birkenwerder - Hohen Neuendorf überlagern sich die jeweils im 20-Minuten-Takt verkehrenden S1 und S8 zu einem 4/16-Takt. Dazu kommt ein ungleicher Fahrzeugeinsatz mit Vollzügen auf der S1 und Halbzügen auf der S8. Ab Frohnau überlagert die mit Dreiviertelzügen bediente Tageszuggruppe die aus Oranienburg kommende Stammzuggruppe zu einem glatten 10-Minuten-Takt. Ab Waidmannslust verkehrt zusätzlich die mit Dreiviertelzügen bediente S85. Im weiteren Verlauf bis Gesundbrunnen vereinigt sich die Strecke mit den Ästen der S25 sowie der S2, S8 und S9, so dass sich abschnittsweise weitere Differenzen der in Abbildung 4.1.2 dargestellten Varianzen der Abfahrtsabstände sowie des Platzangebotes ergeben.[220]

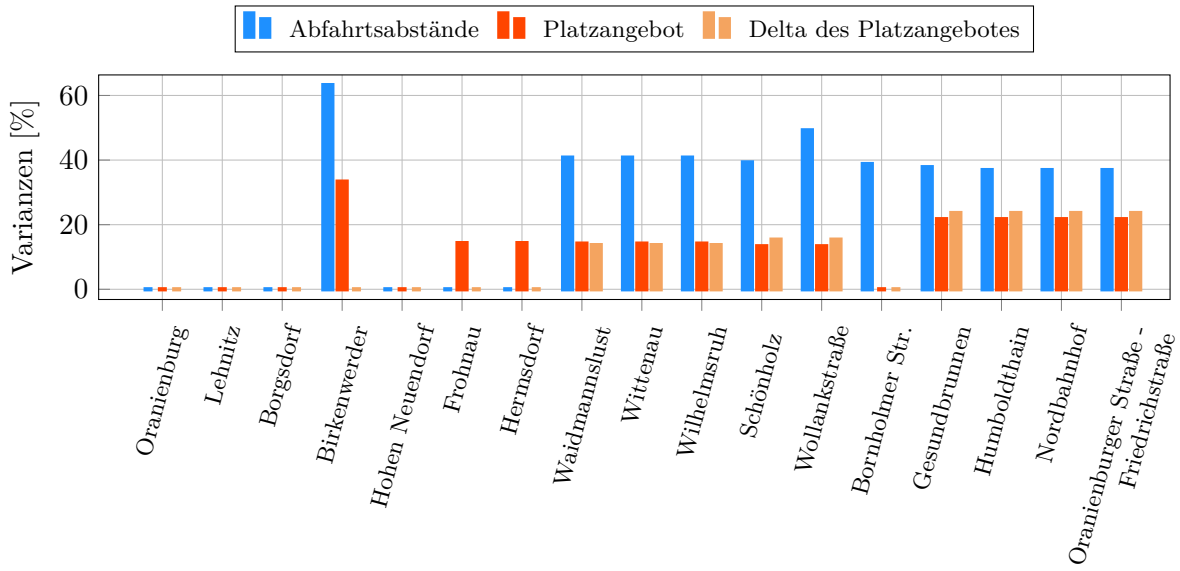

Abbildung 4.1.2: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem nördlichen Ast der Berliner S-Bahn-Linie 1.

[219] Unterschiedliche Fahrzeugtypen seien an dieser Stelle vernachlässigt, da sich das Platzangebot nur geringfügig unterscheidet.

[220] Alle Diagramme zu den Streckenästen in Berlin sind im Anhang A.1 zu finden.

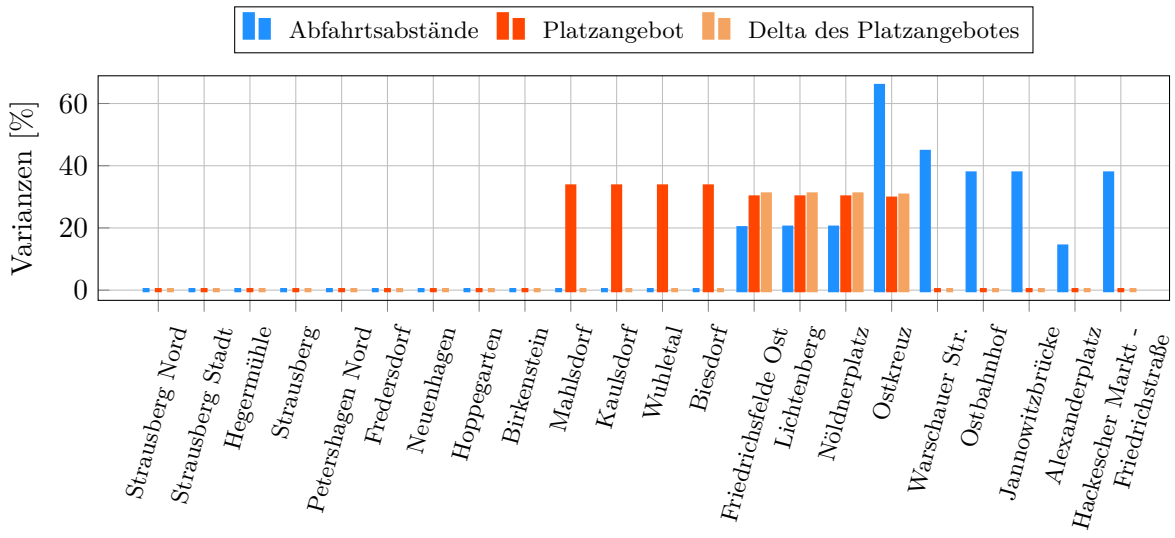

Abbildung 4.1.3: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem östlichen Ast der Berliner S-Bahn-Linie 5.

Ein anderes Bild zeigt Abbildung 4.1.3 für die östliche S5: Hier wird die in Hoppegarten um zehn Minuten versetzt zu der Stammzuggruppe einsetzende Tageszuggruppe ebenfalls mit Vollzügen bedient. Ab Mahlsdorf wird das Angebot zu einem glatten 5-Minuten-Takt verdichtet. Die Ungleichheit ergibt sich nur im Platzangebot, da diese Verstärkerzüge nur als Halbzüge gefahren werden. Die im Kapitel 3.2.1.3 aus Luethi u. a. (2007) zitierten Erkenntnisse zur Fahrgastverteilung, lassen sich wie in Blome (2007, S. 18f.) gezeigt und von Walf (2008, S. 93ff.) bestätigt, nur bedingt auf diesen Ast des Berliner S-Bahn-Netzes übertragen. Hier erfolgt keine gleichmäßige Verteilung der Fahrgäste auf die einzelnen Zuggruppen. Abbildung 4.1.4 zeigt für den Abschnitt Strausberg Nord - Ostkreuz[221] die ungleiche Verteilung der Fahrgäste zwischen der Stammzuggruppe (Strausberg Nord - Ostkreuz, durchgezogene Linie) und der Tageszuggruppe (Hoppegarten - Ostkreuz, gestrichelte Linie). Nur in der Spitzenstunde sieben erreicht die Tageszuggruppe, die mit gleicher Zugstärke verkehrt, vergleichbare Nachfragewerte. Dies dürfte die Folge von Verdrängungseffekten sein, da die Züge der Stammzuggruppe zu dieser Zeit überbesetzt sind.[222] In den Stunden sechs und acht hingegen bleibt trotz gleichem Fahrten- und Platzangebot die Nachfrage weit unter jener in den Zügen der Stammzuggruppe zurück. Eine Erklärung ist in der Abstimmung der umgebenden Linien des ÖPNV auf die ganztägig unverändert verkehrende Stammzuggruppe zu finden sein, auf deren Abfahrtszeiten die Ankunftszeiten der Zubringerlinien von Bus und Straßenbahn abgestimmt sind. Dies ist

[221] Der weitere Linienverlauf über die Stadtbahn ist aufgrund der Überlagerung mit anderen Linien hier nicht maßgeblich.
[222] Vgl. Ausführungen dazu in Blome (2007, S. 20f.).

auf dem betrachteten Streckenast vor allem in Hoppegarten (Bus) sowie Mahlsdorf (Bus und Straßenbahn) der Fall.[223]

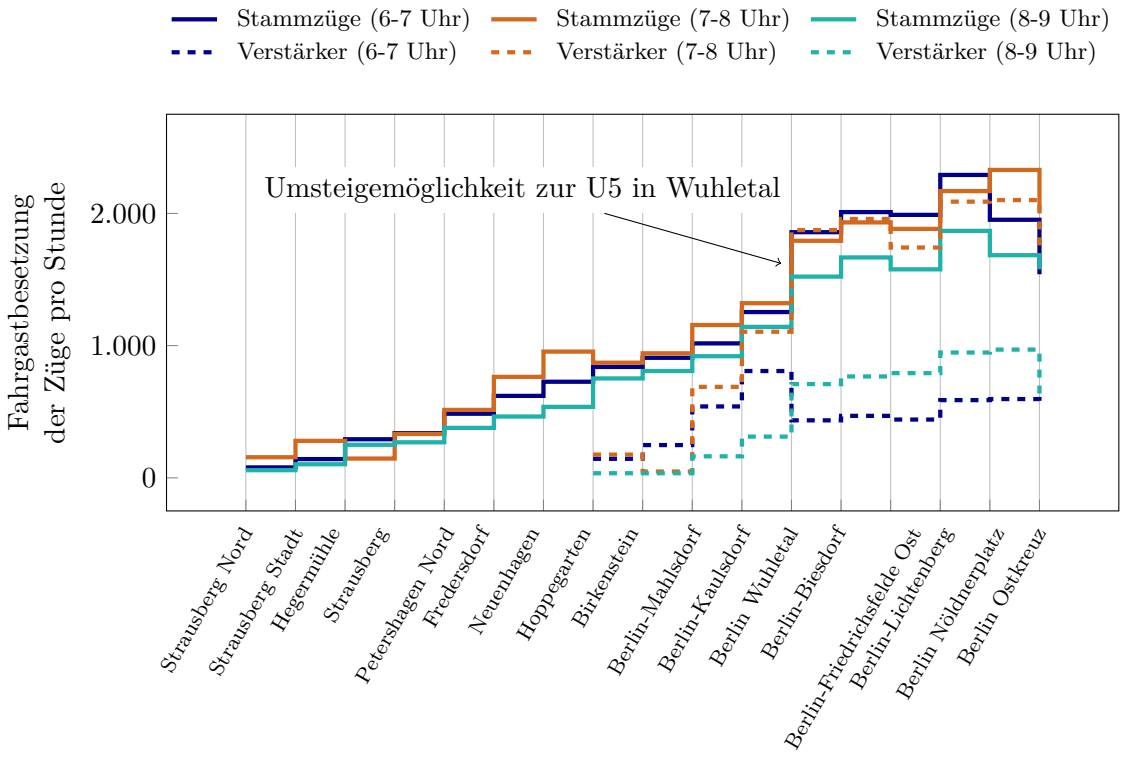

Abbildung 4.1.4: Fahrgastverteilung auf die Zuggruppen am Beispiel der Berliner S-Bahnlinie 5 [eigene Darstellung nach Blome (2007)].

Expressfahrten gibt es innerhalb des Berliner S-Bahn-Netzes derzeit nicht, wenngleich sie beispielsweise in Form der Bankierszüge oder nach Werder in der Vergangenheit existierten.[224] Unter Prof. Ewald Graßmann gab es am Institut für Eisenbahnwesen der Technischen Universität Berlin verschiedene Dissertationen und Studien zu einem System von Fern-Schnellbahnen im Großraum Berlin.[225] Dabei kam man zu dem Schluss, dass es zusätzlicher Infrastruktur bedarf, *„damit diese Züge die S-Bahn-Züge ohne Zeitverlust überholen können.“* (Schreck u. a. 1972, S. 12f.) *„Im Interesse einer hohen Reisegeschwindigkeit [sollten] die FS-Züge nur auf den wichtigsten Bahnhöfen halten. Die Reisegeschwindigkeit [sollte] bei 80 km/h liegen.“* (Götz u. a. 1968, S. 307) Zur damaligen Zeit gab es bedingt durch nicht beseitigte Kriegsschäden und den Mauerbau viele der mittlerweile wieder aufgebauten und von den Regionalverkehrszügen

[223] Vgl. dazu die Fahrgastzustromanalysen bei Walf (2008, S. 93ff.).

[224] Die Bankierszüge verkehrten *„bis Kriegsende zwischen Berlin Potsdamer Fernbahnhof und Berlin-Wannsee ohne Zwischenhalt bis Zehlendorf Mitte.“* Schreck u. a. (1972) nennen Züge nach Werder, die *„zwischen Berlin Potsdamer Fernbahnhof und Neubabelsberg [über] die Gleise der Potsdamer Stammbahn ohne Halt [fuhren . . . und nur] in den Bahnhöfen Neubabelsberg, Potsdam Hbf, Charlottenhof sowie Wildpark“* bis zum Endbahnhof Werder hielten.

[225] Ein Beispiel ist Heinrich (1970). Wenngleich diese Arbeiten in den 1960er und 1970er Jahren nach dem Bau der Berliner Mauer erstellt wurden, betrachteten sie stets ein (wieder-)vereinigtes Berlin.

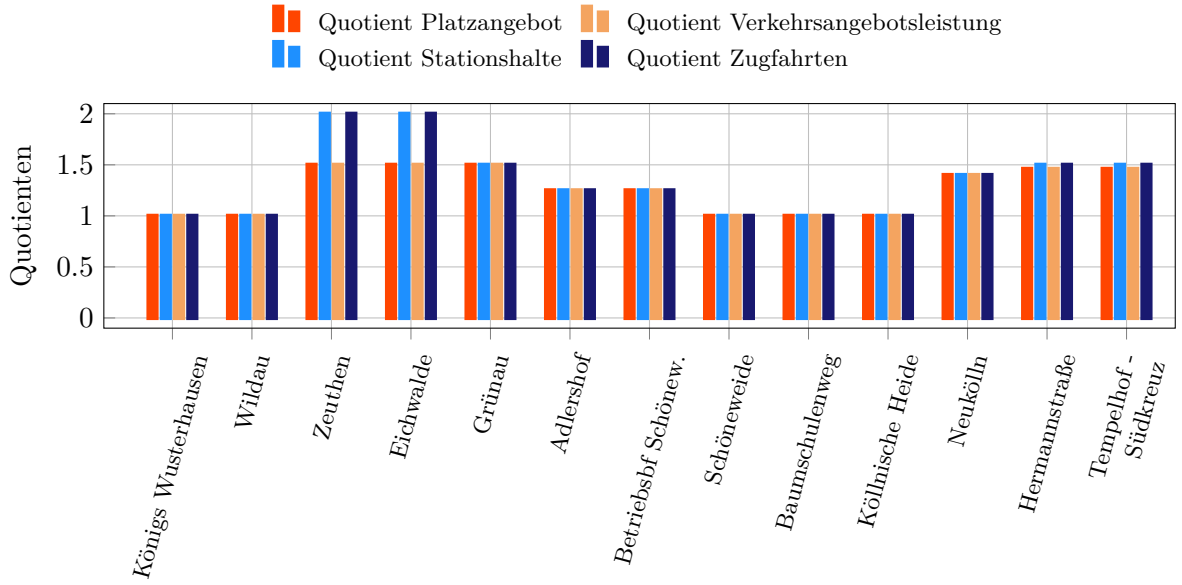

Abbildung 4.1.5: Quotienten auf dem Ast Königs Wusterhausen - Berlin Südkreuz in der HVZ.

genutzten Radialen der Fernbahn nicht. Heute erfüllen die Regionalverkehrszüge die damals beschriebene Funktion der FS-Bahnen. Auch nach der Deutschen Wiedervereinigung gab es Ansätze für Express-S-Bahnen. Über das Stadium von Konzeptstudien kamen diese Untersuchungen jedoch stets nicht hinaus.[226] [227]

Durch die nicht vorhandenen Expressfahrten korrelieren die Quotienten in Abbildung 4.1.6 in vielen Bereichen. Die Steigerungen entlang der Strecken[228] resultieren aus den teilweise verlängerten Verstärkerzuggruppen, so dass den Abbildungen die Zwischenendstellen zu entnehmen sind.[229] Abbildung 4.1.6 zeigt auch deutlich, dass der betrieblich höhere Aufwand durch zusätzliche Fahrten auf mehreren Strecken nicht in gleichem Maße verkehrlichen Nutzen in Form des Platzangebotes stiftet.

Die Abbildungen 4.1.7 bis 4.1.9 zeigen die gemäß der Definitionen in Kapitel 3.2 bestimmten Werte der drei Bereiche Verkehr, Betrieb und Wirtschaftlichkeit für das gesamte S-Bahn-Netz.

[226] Vgl. insbesondere DE-Consult (1996), wo die Eignung der S-Bahn-Strecken nach Königs Wusterhausen, Bernau, Oranienburg und Berlin-Wannsee für zusätzliche Expresszüge untersucht wurde.

[227] Randbemerkung: Nach einem unerwartet früheren Ende eines mehrtägigen Streiks der Lokführergewerkschaft fuhren die Berliner S-Bahnen am 21. Mai 2015 nach der Wiederaufnahme des Betriebs zunächst als Expresszüge ohne Halt zwischen Berlin Westkreuz und Spandau. Ursächlich war hier jedoch das Nichtvorhandensein der noch notwendigen örtlichen Aufsicht und nicht das Ziel einer Fahrzeitreduktion.

[228] Vgl. die beispielhafte Abbildung 4.1.5 sowie die entsprechenden Abbildungen in Anhang A.1 auf Seite A-2.

[229] Im Beispiel in Abbildung 4.1.5 sind dies Zeuthen anstelle von Grünau (S8) und Grünau anstelle von Schöneweide (S85). Die geringere Steigerung auf dem Abschnitt Adlershof - Schöneweide resultiert aus den dort ebenfalls verkehrenden Linien S9 und S45 vom Flughafen Schönefeld, die nicht verdichtet werden.

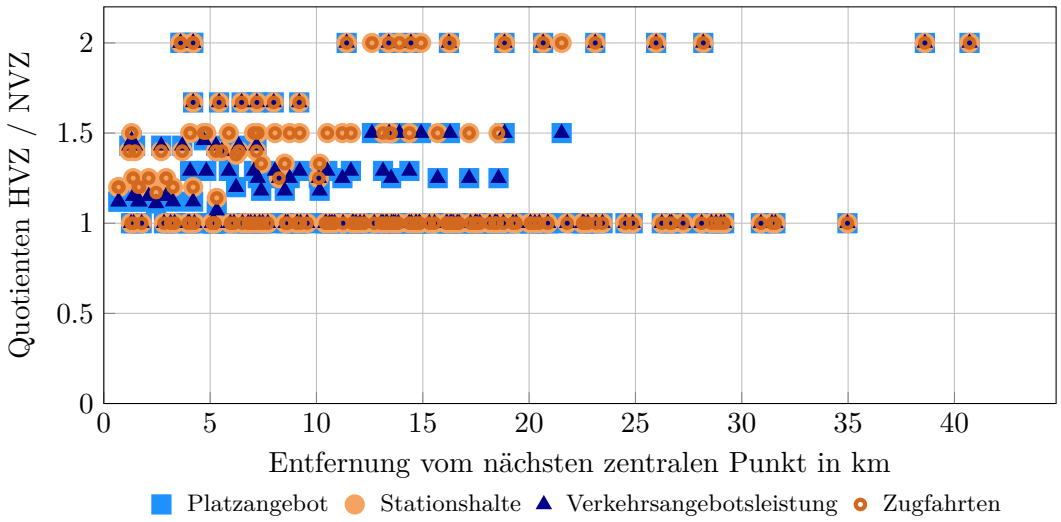

Abbildung 4.1.6: Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei der S-Bahn Berlin.

Die Quotienten des Platzangebotes und der Zugfahrten entlang der Linien zeigen ein sehr unterschiedliches Bild: Der Spitzenwert von 2,0 für die Erhöhung des Platzangebotes und der Zugfahrten wird auf den Abschnitten Erkner - Friedrichshagen (S3), Hoppegarten - Mahlsdorf (S5) sowie auf der nördlichen Ringbahn (S41, S42) erreicht. Hier wird das Grundangebot der Stammzüge mit Zügen gleicher Zugstärke in der HVZ verdoppelt. Auf anderen Abschnitten erfolgt zwar eine Erhöhung des Verkehrsangebotes, jedoch nicht im gleichen Maße eine Erhöhung des Platzangebotes.[230] Hier wird meist das Angebot durch zusätzliche HVZ-Verstärker mit Halbzügen verdichtet. Es erhöht sich folglich der Aufwand in Zugkilometern, der Aufwand in Fahrzeugkilometern steigt jedoch nicht in gleichem Maße.

Innerstädtisch verlaufen die Strecken der S-Bahn weitgehend parallel zu den übrigen Eisenbahnstrecken. Wenngleich die S-Bahn eine größere Zahl an Haltepunkten bedient, halten auch die Züge des Regionalverkehrs an zahlreichen Stationen im Berliner Stadtgebiet. Durch die parallele Führung mehrerer von unterschiedlichen Radialen nach Berlin führender Regionalverkehrslinien auf der Stadtbahn bzw. im Nord-Süd-Tunnel[231] übernimmt auf vielen Relationen der Regionalverkehr die Funktion einer Express-S-Bahn und steht somit *„in direkter Konkurrenz zur S-Bahn.“* (o.A. 1994, S. 25) Bei o.A. (1994, S. 25f.) wurde prognostiziert, dass der Regionalverkehr auf der Stadtbahn zwischen den Bahnhöfen Alexanderplatz und Zoologischer Garten[232] 35% bis 40% des Gesamtfahrgastaufkommens tragen würde - und das trotz eines

[230] Zehlendorf - Potsdamer Platz (S1), Friedrichshagen - Ostbahnhof (S3), Mahlsdorf - Warschauer Str. (S5).
[231] Gemeint ist der Fernbahntunnel zwischen Berlin Hauptbahnhof und Berlin Südkreuz.
[232] Die S-Bahn bedient auf dieser Strecke fünf, der Regionalverkehr zwei Zwischenhalte.

Abbildung 4.1.7: Verkehrliche Vergleichsparameter S-Bahn Berlin.

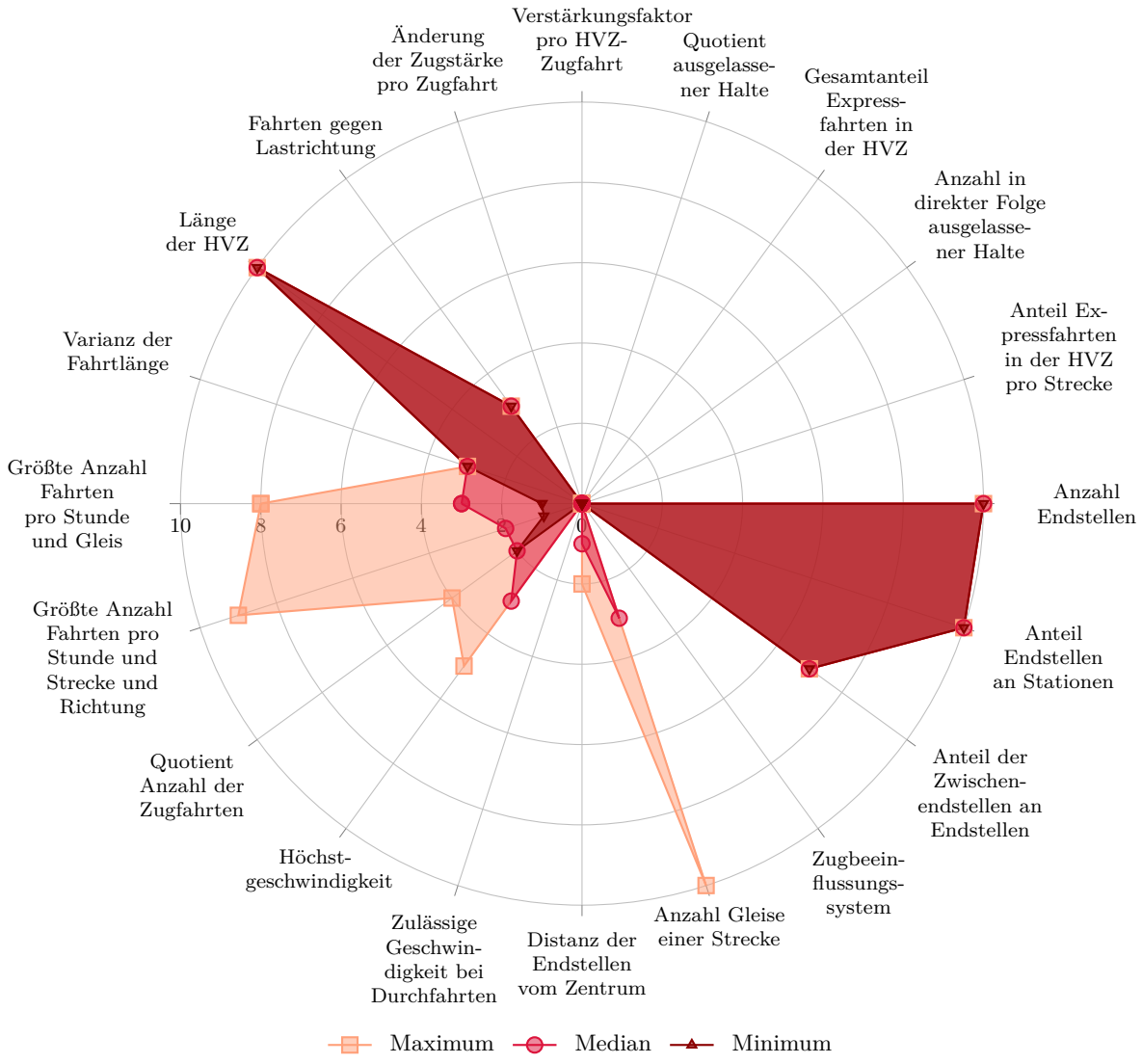

Abbildung 4.1.8: Betriebliche Vergleichsparameter S-Bahn Berlin.

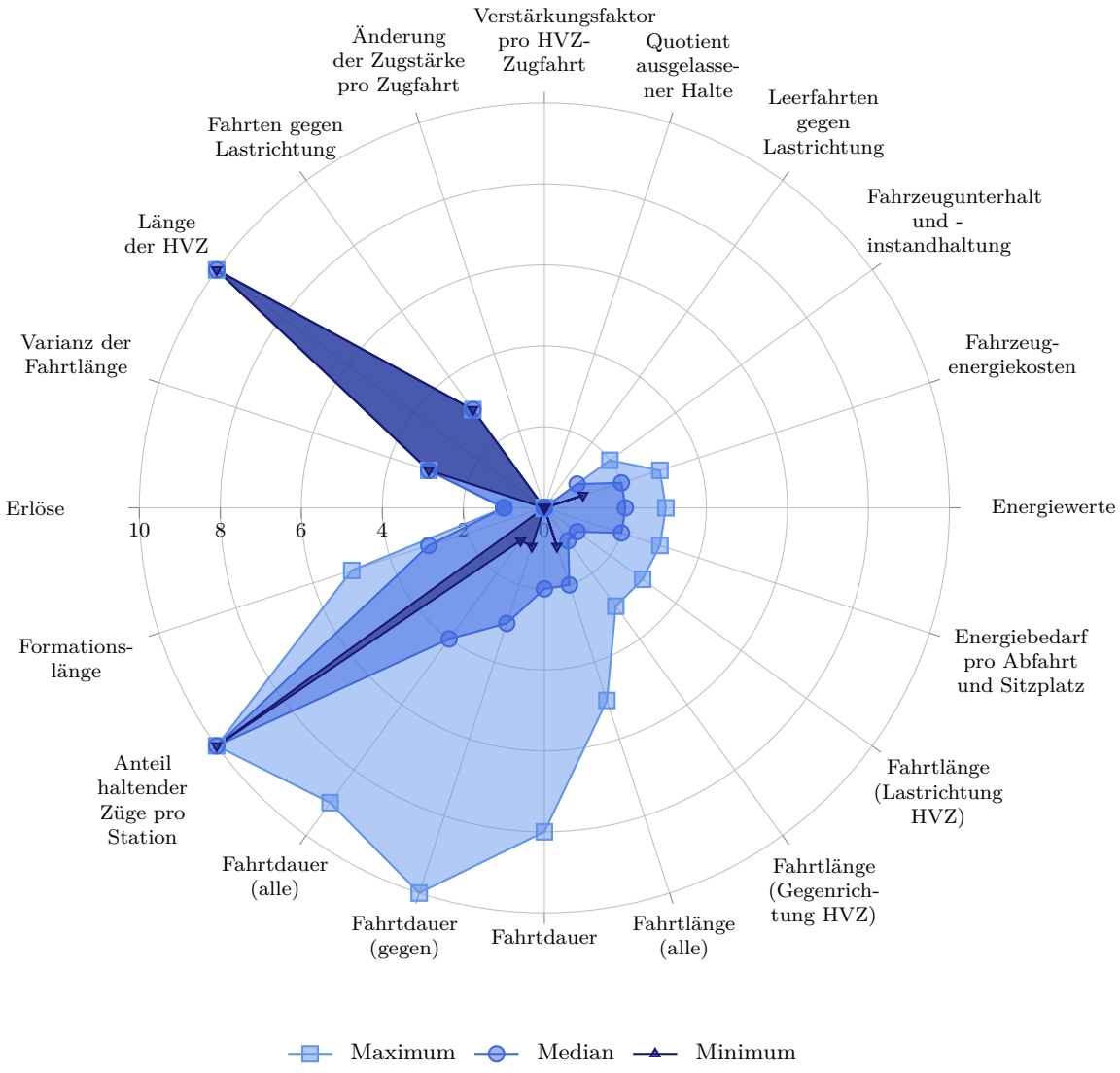

Abbildung 4.1.9: Wirtschaftliche Vergleichsparameter S-Bahn Berlin.

mit etwa fünf Fahrten pro Stunde verglichen mit der parallel in der HVZ etwa alle drei bis vier Minuten verkehrenden S-Bahn deutlich schlechteren Verkehrsangebotes.

Aufgrund der konsequent an allen Stationen haltenden Fahrten sind die Quotienten der Zugfahrten und der Stationshalte deckungsgleich. Reisezeitgewinne durch ausgelassene Halte gibt es entsprechend nicht. Auf den meisten Streckenabschnitten gibt es keinen Unterschied zwischen HVZ und dem restlichen Tagesverkehr. Daher ergibt hier der Median aller Quotienten hier 1.

Eine Zuglängenänderung gibt es weder zwischen HVZ und Grundangebot noch (derzeit) zu unterschiedlichen Tageszeiten[233] oder im Linienverlauf.[234] Die entsprechenden Parameter ergeben sich zu 0.

Insgesamt betrachtet zeigen insbesondere die Abbildungen 4.1.7 und 4.1.9, dass das Berliner S-Bahn-Netz auf der Vergleichsskala mit dem Median weitgehend im unteren Bereich liegt[235] und damit eine vergleichsweise geringe Differenzierung aufweist. Betrieblich herausragend sind sowohl die Länge der HVZ als auch die Komplexität durch eine sehr hohe Anzahl an Endstellen und einen hohen Anteil an Zwischenendstellen. In der wirtschaftlichen Betrachtung sticht einzig das Verhältnis durchfahrender zu haltenden Zügen heraus, welches durch die konsequent an allen Unterwegsstationen haltenden Züge begründet ist.

Die Tabellen 4.1.2 bis 4.1.4 fassen alle zusammengestellten Vergleichsparameter für das Gesamtnetz der Berliner S-Bahn zusammen.

[233] Einzige Ausnahme bildet die östliche S5, auf der in den späteren Abendstunden alle Fahrten in Mahlsdorf gebrochen werden und die Fahrgäste von einem aus der Stadt kommenden Vollzug in einen Halbzug umsteigen müssen. In der Vergangenheit wurde auf vielen Linien in den Abendstunden nur mit Halb- anstelle von Vollzügen gefahren.

[234] Mitte der 2000er Jahre wurde in einigen Fahrplanperioden auf der S8 im Bahnhof Blankenburg in Richtung Birkenwerder ein Viertelzug abgekuppelt und in Gegenrichtung verstärkt.

[235] Die dunklen Bereiche in den Diagrammen sind entsprechend klein.

Tabelle 4.1.2: Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Berlin.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrwiderstand [EUR/Platz-h]	L_i	0	7	24
Halteabstand [km]	l_H	0,50	1,34	9,43
Mittlerer Halteabstand pro Fahrt [km]	$\overline{l_H}$	1,02	1,43	2,42
Median der kürzesten Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,k}}$	1	37	121
Median der Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,g}}$	1	32	121
Reisezeitgewinn (absolut) [Min.]	$\Delta T_{R,abs}$	0	0	0
Reisezeitgewinn (relativ, pro Abschnitt) [%]	$\Delta T_{R,rel}$	0	0	0
Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt [Min.]	t_{aH}	0	0	0
Reisegeschwindigkeit pro Fahrt [km/h]	v_R	16,27	37,01	47,84
Umsteigezwänge	N_U	0	1	2
Quotient der Zugstärkenänderung	η_{ZG}	1	1	1
Quotient Platzangebot	η_P	1	1	2
Quotient Stationshalte	η_S	1	1	2
Quotient der Verkehrsangebotsleistung	η_V	1	1	2
Varianz des Deltas des Platzangebotes [%]	$\nu_{\Delta P}$	0	0	31
Varianz der Abfahrten [%]	ν_Z	0	0	92
Varianz des Platzangebotes [%]	ν_P	0	0	33
Verkehrsangebotsleistung pro Strecke [10^3 Platzkm]	P_V	0,53	4,11	18,16

Tabelle 4.1.3: Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Berlin.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde und Gleis [pro h und Gleis]	$N_{ZZ,G,max}$	3	9	24
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde, Strecke und Richtung [pro h und Richtung]	$N_{ZZ,S,max}$	3	9	33
Quotient Anzahl der Zugfahrten	η_F	1	1	2
Anzahl Gleise einer Strecke	N_G	1	2	4
Distanz der Endstellen vom Zentrum [km]	l_N	10,15	22,76	40,71
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	v_{max}	40	80	100
Zugbeeinflussungssystem	ZUB		1.010	
Zulässige Geschwindigkeit bei planmäßigen Durchfahrten [km/h]	$v_{max,D}$	50	50	50
Änderung der Zugstärke pro Zugfahrt	N_{ZH}	0	0	0
Anteil der Zwischenendstellen an Endstellen [%]	η_{ZE}		60,00	
Anteil Endstellen an Stationen [%]	η_E		20,35	
Anteil Expressfahrten in der HVZ pro Strecke [%]	$\eta_{Ex,S}$	0,00	0,00	0,00
Anzahl Endstellen	N_E		35	
Anzahl in direkter Folge ausgelassener Halte	N_D	0	0	0
Quotient Zugfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,G}$	1	1	1
Gesamtanteil Expressfahrten in der HVZ [%]	η_{Ex}		0,00	
Länge der HVZ [h]	t_{HVZ}		4	
Quotient ausgelassener Halte	η_D	0,00	0,00	0,00
Varianz der Fahrtlänge [%]	ν_N		44,29	
Verstärkungsfaktor pro HVZ-Zugfahrt	l_{ZH}	1	1	1

Tabelle 4.1.4: Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Berlin.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrterlöse [EUR/Zugkm]	E	35,72	53,58	71,44
Formationslänge [m]	l_{Zug}	74	110	147
Anteil haltender Züge pro Station [%]	η_{DH}	1,00	1,00	1,00
Energiebedarf pro Abfahrt und Sitzplatz [kJ/Platz]	$E_{B,S}$	1,95	7,81	12,20
Energiebedarf pro Abfahrt und Zuglängenmeter [kJ/m]	$E_{B,Z}$	4,99	19,95	31,17
Fahrtdauer (Last- und Gegenrichtung HVZ) [Min.]	t_{Fahrt}	17	51	120
Fahrtdauer (Gegenrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,G}$	8	30	110
Fahrtlänge (Last- und Gegenrichtung HVZ) [km]	l_{Fahrt}	10	32	74
Fahrtlänge (Gegenrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,G}$	4	18	43
Fahrtlänge (Lastrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,L}$	4	18	43
Fahrtdauer (Lastrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,L}$	8	31	114
Fahrzeugunterhalt und -instandhaltung [EUR/km]	K_{FZ}	0,68	1,02	1,36
Energiekosten [EUR/km]	K_E	0,82	1,23	1,64
Quotient der Leerfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,GL}$	0	0	0

4.2. S-Bahn Hannover

Im Vorfeld der Weltausstellung *Expo 2000* entstand im Großraum Hannover ein neues S-Bahn-Netz, das in den folgenden Jahren schrittweise durch Integration weiterer Linienäste des Regionalverkehrs ausgeweitet wurde. (Geschwinder u. Göbler 2008, S. 81) Nur etwa ein Fünftel der etwa 380 Streckenkilometer[236] umfassenden von der S-Bahn genutzten Infrastruktur steht den S-Bahn-Zügen allein zur Verfügung. Im restlichen Streckennetz nutzen die Züge der 140 km/h schnellen Baureihe 424 die Infrastruktur gemeinsam mit dem übrigen Regional-, Fern- und Güterverkehr.[237]

Tabelle 4.2.1: Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in Hannover.

Bezeichnung	Sitzplätze	Traktion	Masse [t]	V_{max} [km/h]	Länge [m]	Cluster Referenzfahrzeuge
424	206	Elektro	137	140	68	NV 200 E (3)
424 (Doppeltraktion)	412	Elektro	274	140	135	NV 200 E (3), NV 200 E (3)
424 (Dreifachtraktion)	618	Elektro	411	140	203	NV 200 E (3), NV 200 E (3), NV 200 E (3)

Bei allen Betrachtungen wurde als Ziel der Lastrichtung Hannover Hbf aufgrund der starken Ausrichtung auf das Zentrum als Bezugspunkt gewählt. Die Endstellen liegen zwischen 15,3 und 130 km von diesem Bezugspunkt entfernt. Der Median beträgt 58 km.

Im Gegensatz zu den klassischen S-Bahn-Systemen wie Berlin oder auch München[238] besteht das Verkehrsangebot in der Regel aus einem Stundentakt auf allen Linien. Durch Überlagerung mehrerer Linien entsteht auf vielen Abschnitten ein dichteres Verkehrsangebot. (Deutsche Bahn AG 2015, KBS 360.1 - 360.6) Eine Ausnahme bildet die stark frequentierte Linie S5 in Richtung Hameln, die täglich bis in die Abendstunden weitgehend im Halbstundentakt bedient wird. (Deutsche Bahn AG 2015, KBS 360.5)

Die Überlagerung der Linien führt jedoch nicht an allen Zwischenstationen zu einem verdichteten Verkehrsangebot: Die Linie S5 aus Richtung Paderborn - Hameln durchfährt im Bereich

[236] Eigene Messung in o.A. (2013d), Stand der Daten vom 31. Oktober 2013.
[237] Vgl. außerdem Geschwinder u. Göbler (2008, S. 213) und Tietze (1998). Zu den eingesetzten Formationen siehe Tabelle 4.2.1.
[238] Vgl. Kapitel 4.1 und 4.5.

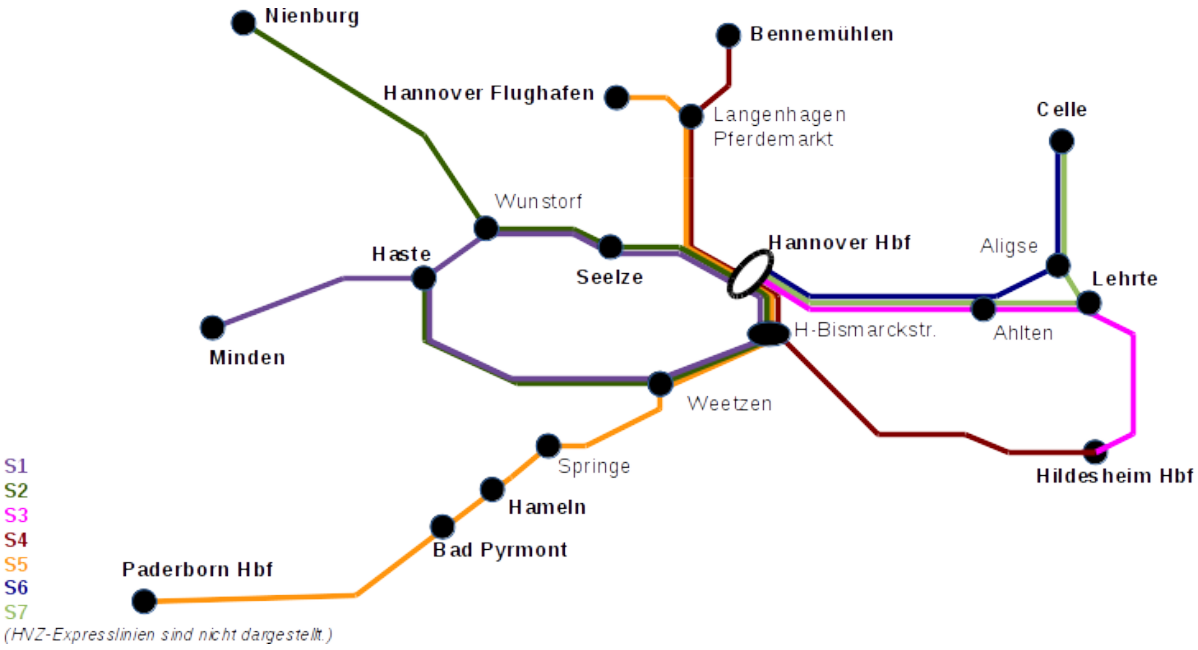

Abbildung 4.2.1: Liniennetzplan der S-Bahn Hannover (ohne HVZ-Expresslinien).

der Überlagerung mit den Linien S1 und S2 ab dem Vereinigungsbahnhof Weetzen drei Zwischenstationen. Im Bereich des Hauptbahnhofs Hannover zwischen Hannover-Nordstadt und Hannover Bismarckstraße ist durch Überlagerung der Linien S1, S2, S4 und S5[239] die dichteste Zugfolge im S-Bahn-Netz vorzufinden mit sieben Fahrten pro Stunde und Gleis. Als Zugbeeinflussung ist die klassische PZB90 im Einsatz. Beinahe die Hälfte der Endbahnhöfe sind Zwischenendstellen.[240] Das Maximum der Zwischenendstellen ist auf der S5 mit Bad Pyrmont und Hameln zu finden. Die meisten anderen Linien weisen keine regulären Zwischenendstellen auf. Diese resultieren überwiegend aus den Expresszügen, die nur abschnittsweise verkehren.

Seit dem Jahresfahrplan 2014 gibt es in dem Netz der S-Bahn Hannover in der morgendlichen und nachmittäglichen HVZ auf zwei Ästen jeweils drei neu eingeführte zusätzliche Expresszüge, die das Angebot gegenüber den restlichen Stunden verdichten.[241] Außerdem verkehren morgens zwei zusätzliche Fahrten zwischen Lehrte und Hildesheim. (Deutsche Bahn AG 2015, KBS 360.3) Die zusätzlichen Expresszüge entlasten die stark frequentierten Linien auf dem Ast von Hameln, Springe und Weetzen nach Hannover. Sie lassen mehrere Zwischenhalte aus. Die

[239] Dazu kommen zudem die unten genannten Verstärkerzüge, die unter den Linienbezeichnungen S21 und S51 geführt werden.

[240] Exakt sind es 46%. Auch der Bahnhof von Haste wird als solche Zwischenendstelle gezählt, da die endenden Züge der S1 und S2 betrieblich denselben Bahnhof nutzen wie die durchfahrenden Züge der S1 nach Minden, wenngleich beide Strecken in der Betriebsdurchführung sehr unabhängig voneinander sind.

[241] Vgl. dazu Deutsche Bahn AG (2015, KBS 360.2, 360.5); Geschwinder u. Göbler (2008, S. 212); o.A. (2012a, e, 2014d); Richter u. Fisser (2012).

Motivation für diese Angebotserweiterung sind einerseits schnelle Verbindungen auf langen Distanzen[242] und andererseits eine Beibehaltung des heutigen Bedienungsstandards auf den von den Expresszügen ausgelassenen Halten. So ergibt sich zwischen Weetze und Hannover Hbf ein mehrfach abgestuftes System mit vier sich überlagernden unterschiedlichen Halteschemata.[243] Abbildung 4.2.2 zeigt die Wirkung der nicht alle Zwischenhalte bedienenden Expresszüge am Beispiel der S5, wo zwischen Hameln und Hannover Hbf einige Zwischenhalte ausgelassen werden und so trotz zusätzlich verkehrender Züge keine Verdichtung der Stationshalte vorliegt. Abbildung 4.2.3 zeigt die aus dieser Überlagerung verbunden mit unterschiedlichen Zuglängen resultierenden Varianzen.[244] Die Expressfahrten verkehren in beide Richtungen als Fahrgastfahrten und entsprechend ab dem Stadtzentrum bis zum Endbahnhof auch entgegen der Lastrichtung. Auf den Abschnitten mit Linienüberlagerung besteht im zentralen Bereich kein glatter Takt. Auf den Außenästen ergeben die Linien S1/S2 sowie S6/S7 jeweils einen 30-Minuten-Takt[245]

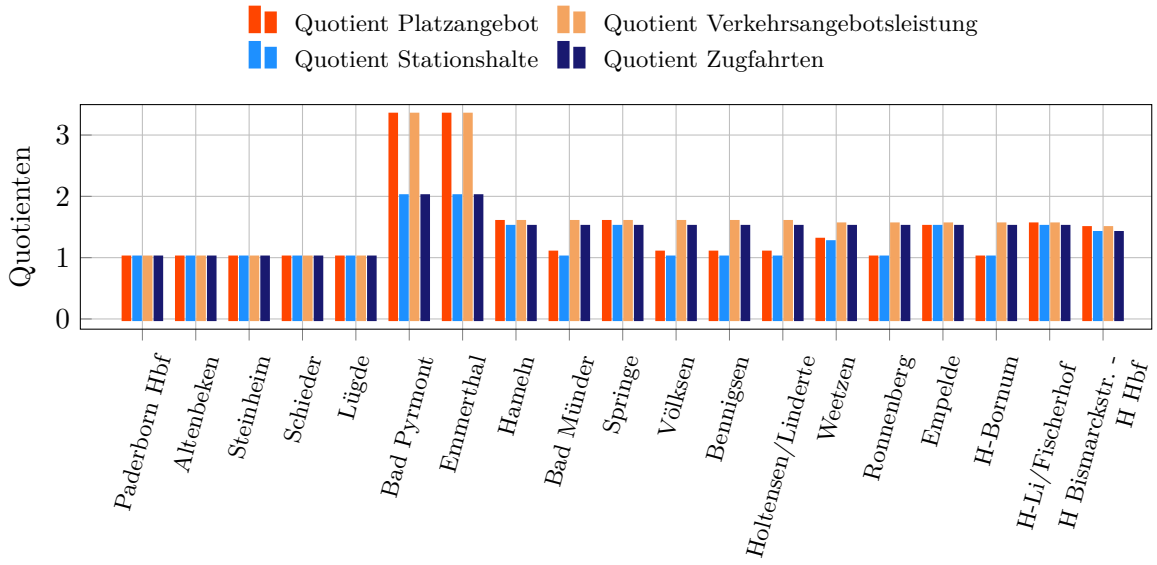

Abbildung 4.2.2: Quotienten auf dem Ast Paderborn - Hannover.

[242] Die S5 von Paderborn über Hameln nach Hannover hat eine Streckenlänge von über 100 km. (Geschwinder u. Göbler 2008, S. 212) Allerdings beginnen die Expressfahrten entgegen der ursprünglichen Darstellungen erst in Hameln und kommen nicht bereits aus Paderborn. Vgl. auch o.A. (2012a, S. 2).

[243] Die Linien S1 und S2 bedienen alle Zwischenhalte. Die Expressfahrten aus Barsinghausen (S21) lassen die Zwischenhalte Ronnenberg und Hannover-Bornum aus. Die Züge der S5 lassen die drei Zwischenhalte Ronnenberg, Empelde und Hannover-Bornum aus. Und die Expresszüge aus Hameln (S51) lassen abgesehen des Bahnhofs Springe alle acht weiteren Zwischenhalte bis Hannover-Linden aus.

[244] Alle Diagramme zu den Streckenästen in Hannover sind im Anhang A.2 zu finden.

[245] Bei den Linien S1 und S2 ist dies zwischen Wunstorf und Haste über Hannover Hbf der Fall. Bei den Linien S6 und S7 ergibt sich zwischen Aligse und Celle ein angenäherter 30-Minuten-Takt mit Abweichungen im Minutenbereich.

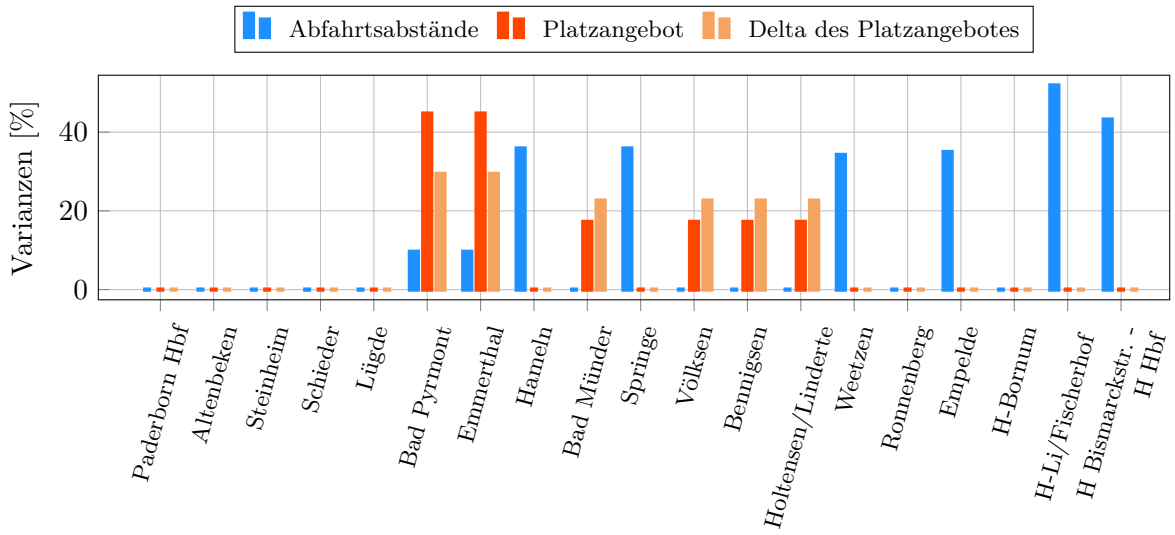

Abbildung 4.2.3: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Paderborn - Hannover in der HVZ.

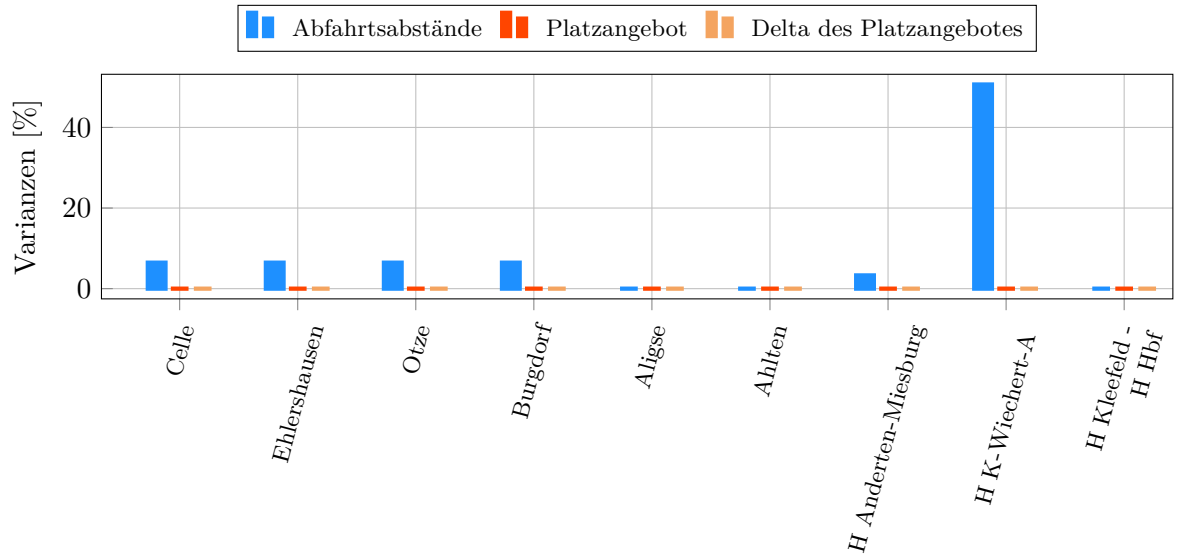

Abbildung 4.2.4: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Celle - Hannover in der HVZ.

Auch auf dem in Abbildung 4.2.4 dargestellten östlichen Ast aus Richtung Celle gibt es eine Linie, die Zwischenhalte auslässt. Die Abfahrten der jeweils stündlich verkehrenden Linien S3 und S7[246] in Hannover Hbf in Richtung Lehrte erfolgen um 30 Minuten versetzt. (Deutsche Bahn AG 2015, KBS 360.3, 360.6.7) Sieben Minuten nach der nur bis Lehrte auf dem Korridor verkehrenden S3 fährt die S6 in Hannover Hbf in Richtung Celle ab.[247] Die Züge der S6 lassen jedoch den Halt in Lehrte sowie weitere Zwischenhalte zwischen Hannover Hbf und Aligse aus[248] und bedienen auf diesem Abschnitt nur die Station Karl-Wiechert-Allee. Die Züge haben dadurch eine um etwa zehn Minuten kürzere Fahrzeit.[249] Die Linien S3 und S7 bilden somit die Grundbedienung aller Stationen zwischen Hannover Hbf und Lehrte im Halbstundentakt. Auf dem Abschnitt nördlich von Lehrte, den die S3 nicht befährt, übernehmen die Züge der S6 die Grundbedienung zu einem angenäherten Halbstundentakt.[250]

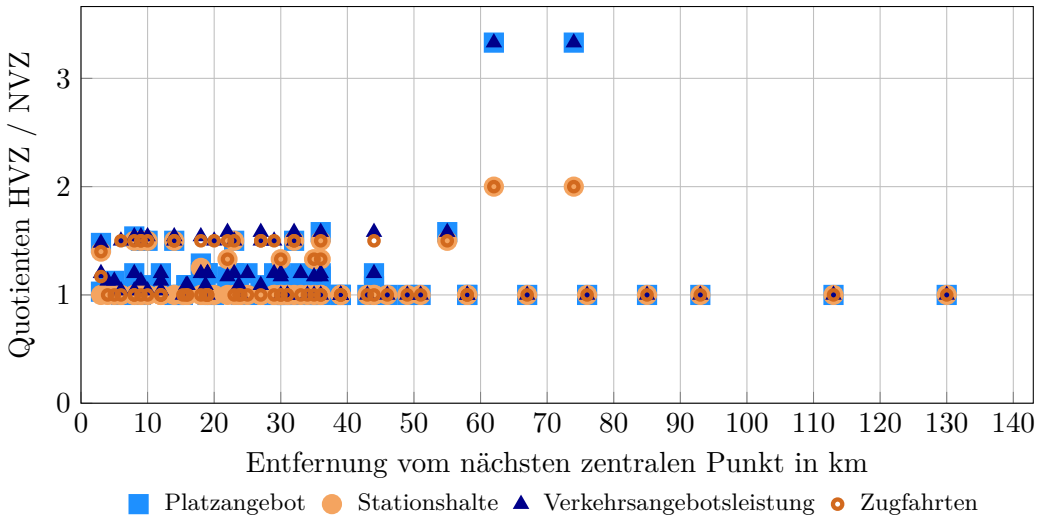

Abbildung 4.2.5: Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei der S-Bahn Hannover.

Weiterhin erfolgt auf dem Großteil der Streckenäste keine Unterscheidung zwischen dem Tagesverkehr und der HVZ, so dass die über alle Stationen und Streckenäste betrachtet ermittelten Quotienten der Zugfahrten und Stationshalte kaum Änderungen darstellen.[251] Leichte Steigerungen des Platzangebotes ergeben sich dadurch, dass auf mehreren Linien am Vormittag einzelne Fahrten nur als Kurzzug verkehren, in der HVZ jedoch ausnahmslos alle Züge mindes-

246 In Abbildung 4.2.1 in rosa (S3) und grün (S7) dargestellt.
247 In Abbildung 4.2.1 in blau dargestellt.
248 Unter anderem umfahren sie den Bahnhof Lehrte über eine Verbindungskurve, so dass der Richtungswechsel dort entfallen kann.
249 Die Gesamtfahrzeit beträgt 35 Minuten für die S6 und 44 bzw. in Gegenrichtung 46 Minuten für die S7.
250 Zugfolgebedingt ergibt sich ein 28/32-Minuten-Abstand zwischen S6 und S7 in diesem Bereich.
251 Vgl. Abbildung 4.2.5. Die Ausdünnung des Verkehrsangebotes auf allen Linien in den letzten zwei Betriebsstunden ist hier nicht von Interesse.

tens in Doppeltraktion verkehren. Einzig zwischen Bad Pyrmont und Hameln ergibt sich mit einem Quotient des Platzangebotes von 3,33 eine signifikant große Steigerung, da es hier in der HVZ neben dem durch das einzelne stündliche Fahrzeug aus Paderborn dargestellten Grundangebot über Hameln hinaus rückverlängerte Verstärkung durch Züge in Mehrfachtraktion gibt.[252] Weitere kleinere Verdichtungen ergeben sich aus den oben genannten zusätzlichen Expressfahrten. Als Länge der HVZ werden die drei Stunden angesetzt, in denen die zusätzlichen Expresszüge verkehren.[253]

Unterschiede findet man auf den Linien S5 und S7, wo je eine Fahrt als Langzug durchgeführt wird. Während der Langzug auf der S5 angebotsseitig motiviert ist, da er in Lastrichtung verkehrt, resultiert der Langzug auf der S7 eher aus der Umlaufplanung, da das dritte Fahrzeug in Lehrte abgekuppelt wird und auf die S3 als einteiliger Verstärkerzug übergeht. Auf der Linie S5 wird ganztägig zwischen Paderborn und Hameln mit Kurzzügen gefahren, ab Hameln nach Hannover jedoch in der Regel mit Vollzügen. Entsprechend wird hier ganztägig im Linienverlauf einmal pro Fahrt die Zugkonfiguration geändert.

Die differenzierte Bedienung zeigt sich in den Werten zum Reisezeitgewinn. Dieser ist in Tabelle 4.2.2 für den Jahresfahrplan 2016 aus Deutsche Bahn AG (2015, KBS 360.2, 360.5, 360.6.7) dargestellt.[254]

Tabelle 4.2.2: Reisezeitgewinne bei der S-Bahn Hannover.

Anzahl Fahrten	Abschnitt	t (m. Halt)	t (o. Halt)	Δ Halte	$\Delta t_{R,abs}$	η_D
3	Aligse - H Hbf	20	15	3	5	0.33
3	Hameln - H-Li/Fischerhof	38	32	8	6	0.67
3	Letter - H Hbf	9	6	2	3	0.5
3	Barsinghausen - H-Li/Fischerhof	24	21	5	3	0.45
3	Weetzen - H-Li/Fischerhof	10	7	3	3	0.16
3	Weetzen - H-Li/Fischerhof	10	7	3	3	0.21

Der sich aus den Werten in Tabelle 4.2.2 ergebende Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt liegt zwischen null (Barsinghausen - Wennigsen) und zwei Minuten (Karl-Wiechert-Allee - Hannover Hbf), der Median liegt bei einer Minute.

[252] In der Regel sind es Doppeltraktionen. In einer Stunde verkehrt ein dreiteiliger Langzug. [E-Mail der Region Hannover, Herr Otto, vom 8. November 2013].

[253] Maßgeblich ist die Ankunfts-/ Abfahrtszeit in Hannover Hbf.

[254] Der Abschnitt Aligse - Lehrte - Ahlten fehlt in der Tabelle, da die Züge der S6 durch Nutzung einer Verbindungskurve direkt von Aligse nach Ahlten fahren und somit eine andere Strecke als die in Lehrte haltenden Züge der S7 benutzen.

Die verkehrliche Differenzierung zeigt sich in Abbildung 4.2.6 in den relativ großflächigen Färbungen, wenngleich dies vor allem die Maxima betrifft und nur in einigen Kriterien auch der Median im stärker differenzierten Bereich liegt. Betrieblich stechen in Abbildung 4.2.7 einerseits die Kriterien zu Geschwindigkeiten sowie andererseits die Ausdehnung sowie der Anteil ausgelassener Halte bei den Expressfahrten hervor. Bei den in Abbildung 4.2.8 dargestellten wirtschaftlichen Kriterien zeigt sich, dass der Anteil der Stationen mit durchfahrenden Zügen vergleichsweise gering ist, da im Median alle Züge die jeweiligen Station bedienen. Da das Netz vergleichsweise lange Streckenäste hat, sind die Maxima der Fahrtdauer und -länge entsprechend groß.

Die Tabellen 4.2.3 bis 4.2.5 zeigen die Vergleichsparameter für das gesamte Netz.

Tabelle 4.2.3: Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Hannover.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrwiderstand [EUR/Platz-h]	L_i	0	9	48
Halteabstand [km]	l_H	1,00	4,00	28,00
Mittlerer Halteabstand pro Fahrt [km]	$\overline{l_H}$	2,55	4,83	13,75
Median der kürzesten Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,k}}$	2	50	214
Median der Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,g}}$	2	47	214
Reisezeitgewinn (absolut) [Min.]	$\Delta T_{R,abs}$	0	2	6
Reisezeitgewinn (relativ, pro Abschnitt) [%]	$\Delta T_{R,rel}$	0	21	33
Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt [Min.]	t_{aH}	0	1	2
Reisegeschwindigkeit pro Fahrt [km/h]	v_R	50,59	66,21	93,33
Umsteigezwänge	N_U	0	1	2
Quotient der Zugstärkenänderung	η_{ZG}	1	1	3
Quotient Platzangebot	η_P	1	1	3
Quotient Stationshalte	η_S	1	1	2
Quotient der Verkehrsangebotsleistung	η_V	1	1	3
Varianz des Deltas des Platzangebotes [%]	$\nu_{\Delta P}$	0	0	29
Varianz der Abfahrten [%]	ν_Z	0	0	57
Varianz des Platzangebotes [%]	ν_P	0	0	45
Verkehrsangebotsleistung pro Strecke [10^3 Platzkm]	P_V	0,41	3,30	14,35

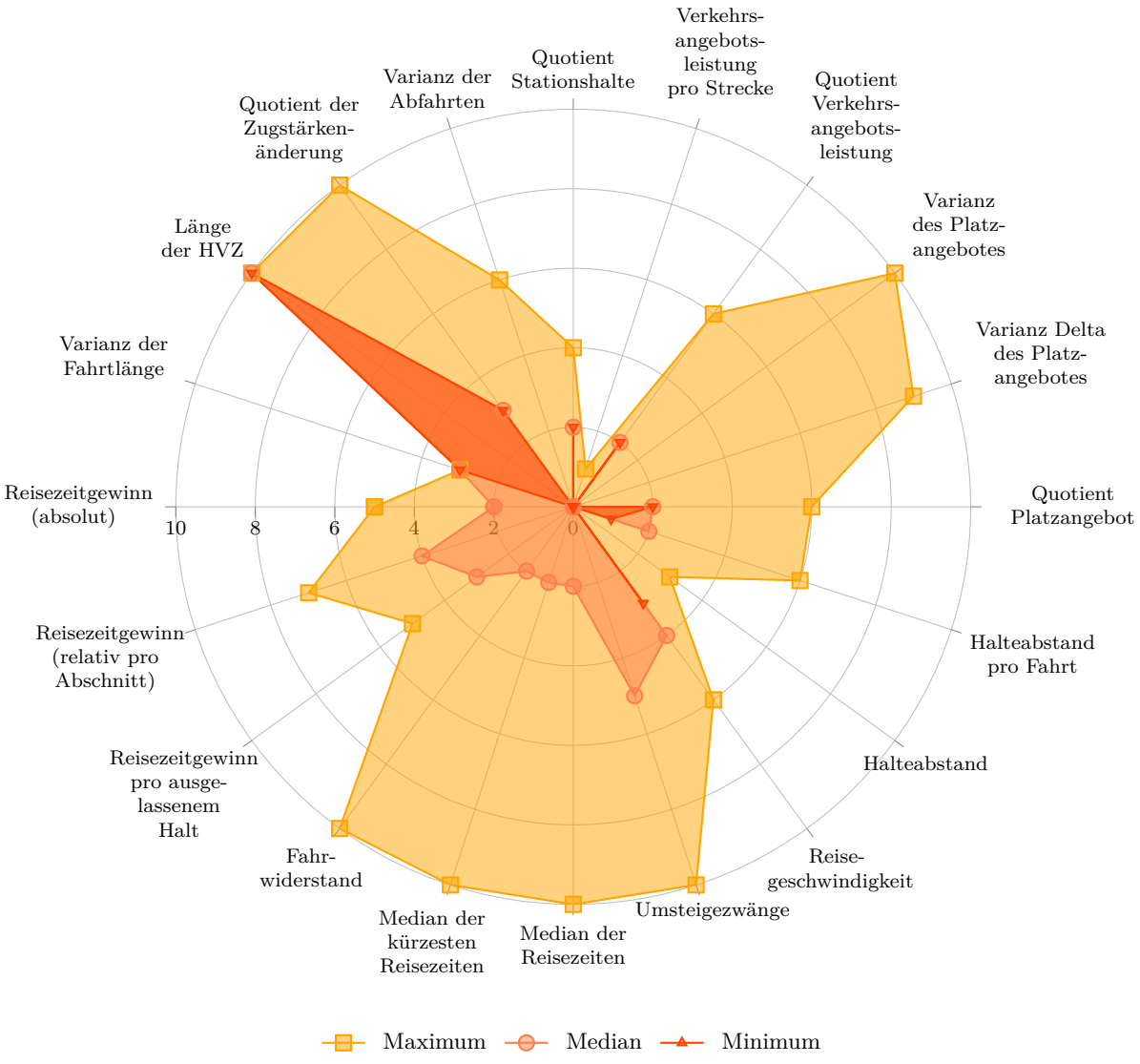

Abbildung 4.2.6: Verkehrliche Vergleichsparameter S-Bahn Hannover.

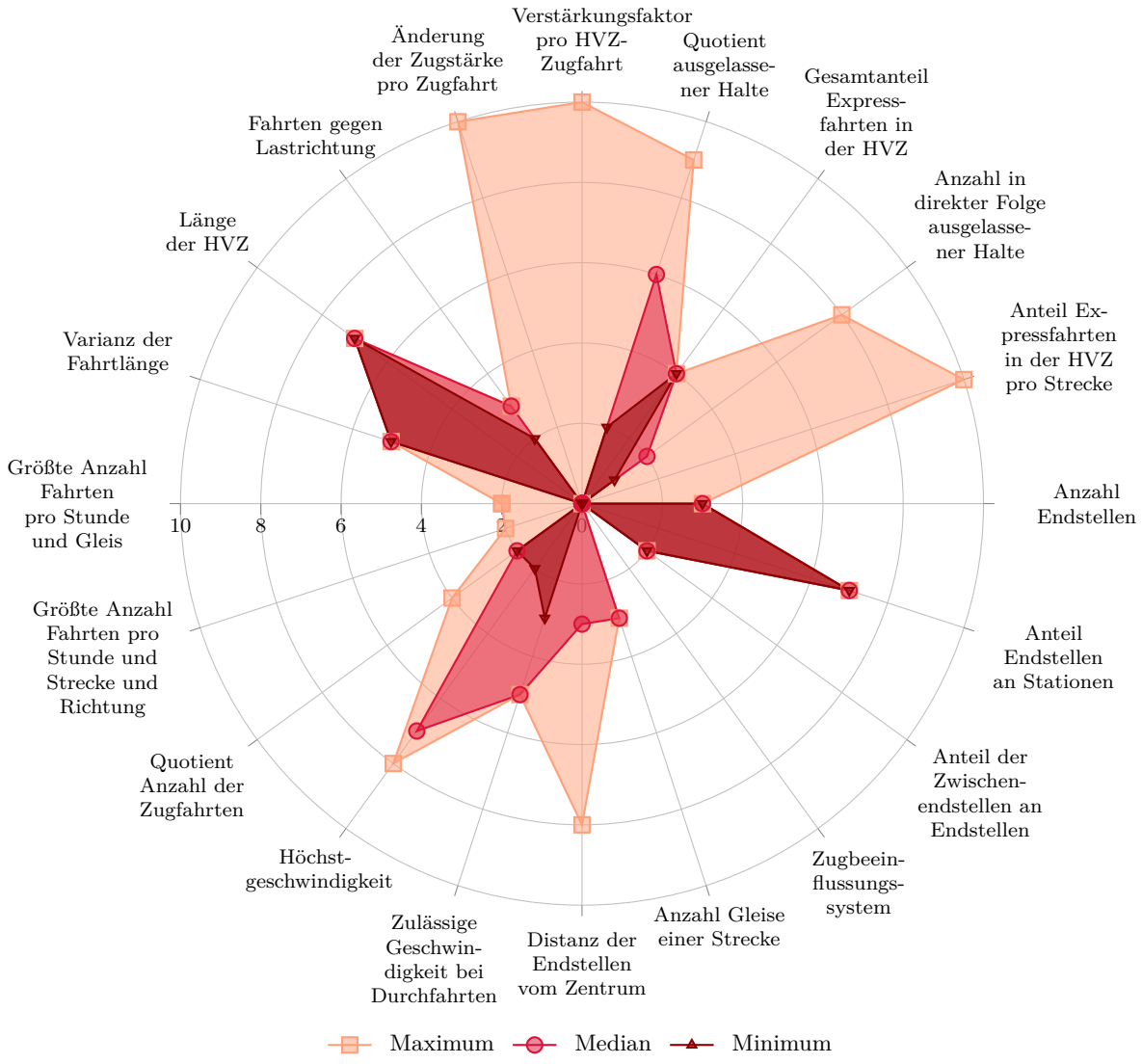

Abbildung 4.2.7: Betriebliche Vergleichsparameter S-Bahn Hannover.

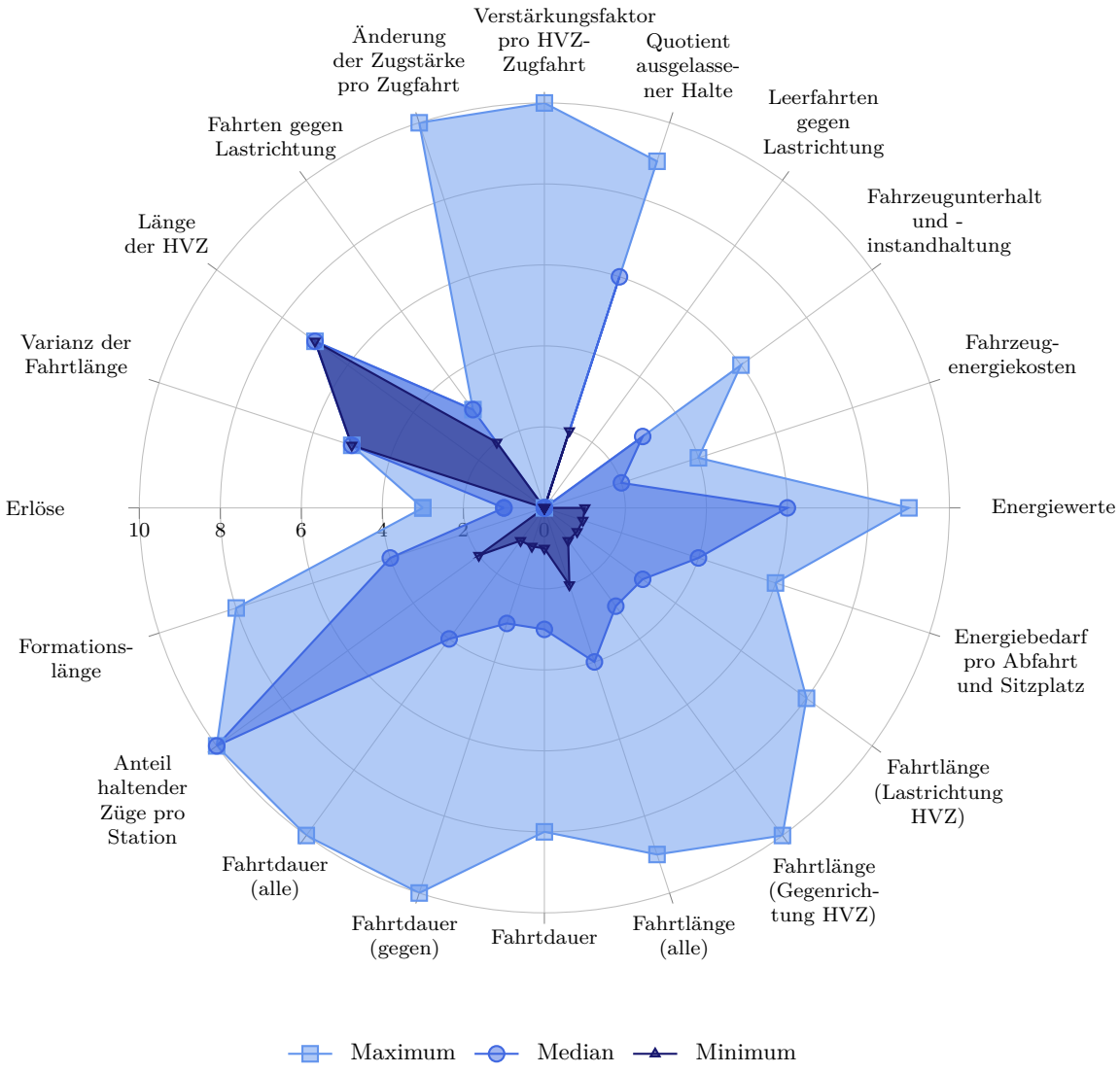

Abbildung 4.2.8: Wirtschaftliche Vergleichsparameter S-Bahn Hannover.

Tabelle 4.2.4: Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Hannover.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde und Gleis [pro h und Gleis]	$N_{ZZ,G,max}$	1	2	7
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde, Strecke und Richtung [pro h und Richtung]	$N_{ZZ,S,max}$	1	2	7
Quotient Anzahl der Zugfahrten	η_F	1	1	2
Anzahl Gleise einer Strecke	N_G	1	2	2
Distanz der Endstellen vom Zentrum [km]	l_N	15,30	58,00	130,00
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	v_{max}	60	120	140
Zugbeeinflussungssystem	ZUB		100	
Zulässige Geschwindigkeit bei planmäßigen Durchfahrten [km/h]	$v_{max,D}$	95	120	120
Änderung der Zugstärke pro Zugfahrt	N_{ZH}	0	0	1
Anteil der Zwischenendstellen an Endstellen [%]	η_{ZE}		46,15	
Anteil Endstellen an Stationen [%]	η_E		17,57	
Anteil Expressfahrten in der HVZ pro Strecke [%]	$\eta_{Ex,S}$	0,00	0,00	100,00
Anzahl Endstellen	N_E		13	
Anzahl in direkter Folge ausgelassener Halte	N_D	1	2	7
Quotient Zugfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,G}$	1	1	1
Gesamtanteil Expressfahrten in der HVZ [%]	η_{Ex}		34,62	
Länge der HVZ [h]	t_{HVZ}		3	
Quotient ausgelassener Halte	η_D	0,16	0,45	0,67
Varianz der Fahrtlänge [%]	ν_N		60,37	
Verstärkungsfaktor pro HVZ-Zugfahrt	l_{ZH}	1	1	2

Tabelle 4.2.5: Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn Hannover.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrterlöse [EUR/Zugkm]	E	39,14	78,28	117,42
Formationslänge [m]	l_{Zug}	68	135	203
Anteil haltender Züge pro Station [%]	η_{DH}	0,33	1,00	1,00
Energiebedarf pro Abfahrt und Sitzplatz [kJ/Platz]	$E_{B,S}$	4,65	18,62	25,34
Energiebedarf pro Abfahrt und Zuglängenmeter [kJ/m]	$E_{B,Z}$	14,20	56,82	77,33
Fahrtdauer (Last- und Gegenrichtung HVZ) [Min.]	t_{Fahrt}	21	58	131
Fahrtdauer (Gegenrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,G}$	8	39	111
Fahrtlänge (Last- und Gegenrichtung HVZ) [km]	l_{Fahrt}	25	63	145
Fahrtlänge (Gegenrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,G}$	14	43	130
Fahrtlänge (Lastrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,L}$	14	43	130
Fahrtdauer (Lastrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,L}$	9	40	111
Fahrzeugunterhalt und -instandhaltung [EUR/km]	K_{FZ}	0,82	1,64	2,46
Energiekosten [EUR/km]	K_E	0,64	1,28	1,92
Quotient der Leerfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,GL}$	0	0	0

4.3. Nahverkehr im Großraum Helsinki

Im Gegensatz zu dem sehr dünn besiedelten Großteil des Landes ist der Großraum Helsinki, in dem mit etwa einer Million Einwohnern fast ein Fünftel der finnischen Bevölkerung leben, dicht besiedelt. (o.A. 2012b) Entsprechend unterscheidet sich das Verkehrsangebot auf der Schiene stark zwischen den zum Teil nur mit einzelnen Fahrten befahrenen Strecken im Land und den in dichter Folge befahrenen Nahverkehrsstrecken der Hauptstadtregion.[255] Mehr als 80 Prozent des jährlichen Verkehrsaufkommens und der Verkehrsleistung auf dem finnischen Netz entfallen auf den Nahverkehr. (o.A. 2011e, S. 34f.)

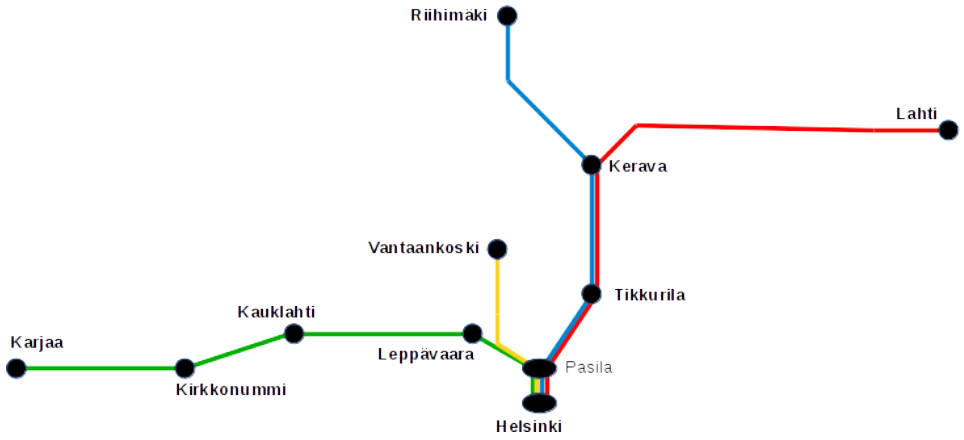

Abbildung 4.3.1: Liniennetzplan Helsinki.

Das in Abbildung 4.3.1 dargestellte Liniennetz des Nahverkehrs gliedert sich in vier farblich gekennzeichnete Korridore mit sehr unterschiedlicher verkehrlicher Bedeutung und entsprechend differenziertem Verkehrsangebot. (Schmid 2011) Alle Fahrten beginnen oder enden im Hbf von Helsinki.[256] Die Strecken verlaufen von dort parallel auf acht Verkehrsgleisen[257] bis zum Trennungsbahnhof Pasila, wo sie sich in zwei Richtungen mit je vier Gleisen verzweigen. (Linderoos 2012, S. 27) Die Fahrten werden neben der betrieblichen Zugnummer mit je einem Buchstaben bezeichnet, der eindeutig kennzeichnet, welche Stationen die Fahrt bedient.[258] Auf

[255] Nur die Verkehre der Hauptstadtregion werden in Finnland als Nahverkehr bezeichnet und von VR Commuter Rail betrieben. (Linderoos 2012, S. 19)

[256] Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich auf die Zeit vor der Inbetriebnahme der neuen Ringlinie zur Flughafenanbindung in Helsinki im Juli 2015, die seitdem die gelbe Strecke von Vantaankoski über den Flughafen Helsinki-Vantaa mit den östlichen Ästen nördlich von Tikkurila verbindet und in beide Richtungen von Zügen mit Start und Ziel (über Vantaankoski, Flughafen und Tikkurila) befahren wird.

[257] Die weiteren Gleise sind den Fahrten von und zum Betriebsbahnhof Ilmala vorbehalten.

[258] Das Schema ist vergleichbar mit den in Kapitel 5.1.3 auf Seite 188 beschriebenen Missionscodes in Paris, wobei das finnische Netz mit 15 unterschiedlichen Bezeichnungen auskommt, so dass hier die einzelnen Buchstaben genügen.

den Radialen befinden sich zwischen null und drei Zwischenendstellen. 56% der Endbahnhöfe sind Zwischenendstellen.

Basis der Analyse des Fahrtenangebotes im Nahverkehr des Großraums Helsinki ist VR (2011) sowie ein von VR-Yhtymä Oy (VR) im Jahr 2013 zur Verfügung gestelltes Tabellendokument[259] zum Einsatz von Fahrzeugen auf den einzelnen Fahrten. Als HVZ ergibt sich aus dem Verkehrsangebot ein Zeitraum von zwei Stunden.[260] Die Gleise im Bereich Helsinki - Pasila werden pro Stunde und Richtung von jeweils bis zu zwölf Zügen befahren. Als Zugbeeinflussungssystem kommt ATP-VR/RHK zum Einsatz, ein EBICAB-System mit Führerstandssignalisierung, das mit punktueller Übertragung mit Balisen arbeitet.[261]

Im 87 km langen *grünen* Korridor gibt es sechs Gruppen von Zügen, die alternierend die Zwischenhalte des in westliche Richtung führenden Korridors von Helsinki über den Ort des zentralen Betriebswerks Ilmala nach Karjaa bedienen. Auf dem Korridor gibt es mit Leppävaara, Kauklahti und Kirkkonummi neben dem Endbahnhof Karjaa drei Zwischenendstellen, an denen jeweils alle dort verkehrenden Nahverkehrszüge halten. Am Streckenanfang in Helsinki verkehren werktäglich 147 Zugpaare, am anderen Streckenende zwischen Kirkkonummi und Karjaa sind es nur sechs. Abgesehen von je einer zusätzlichen Fahrt pro Stunde von Karjaa nach Helsinki, die nur in den Spitzenstunden[262] angeboten wird und nur einzelne Zwischenhalte bedient sowie vier zusätzlicher Stationsbedienungen im Bereich Kirkkonummi - Kauklahti, folgen alle anderen Linien den ganzen Tag über einem festen Bedienungsschema. Die Verdichtung in den Spitzenstunden erfolgt über eine Erhöhung der Taktdichte auf dem zentrumsnahen Abschnitt Leppävaara - Helsinki. Hier verkehren die Züge alle zehn Minuten anstelle des 20-Minuten-Taktes außerhalb der HVZ. Der Median des Quotient der Stationsbedienung liegt auf diesem Korridor bei 1,57. Die meisten Stationen dieses Korridors werden unregelmäßig bedient. Zwischen Leppävaara und Pasila, wo nur die Vorortzüge aus Leppävaara halten, ergibt sich ein gleichmäßiges Angebot. Der Abschnitt Karjaa - Kirkkonummi wird in der HVZ nur in Lastrichtung befahren - der erste Zug in Gegenrichtung verkehrt erst nach dem Ende der HVZ, so dass das HVZ-Angebot hier unpaarig ist.

Die Strecke dieses Korridors ist von Helsinki bis Leppävaara viergleisig, von dort bis Kirkkonummi zweigleisig und auf dem letzten Abschnitt bis Karjaa nur eingleisig. (o.A. 2011c, S. 7) An den Zwischenendstellen reduziert sich aus Richtung Helsinki kommend somit auch die

[259] Es handelt sich um *Junanumeroluettelo*, frei übersetzt *Zugnummernliste*.
[260] Je nach Korridorlänge erstreckt sich das dichte Verkehrsangebot über einen längeren Zeitraum. Ankunft des dichten Verkehrsangebotes ist in Helsinki weitgehend zwischen 6 und 8 Uhr.
[261] Zu EBICAB vgl. Trafiksäkerhetsverket (2013, S. 16) sowie die Entscheidung der Kommission 2002/731/EG, Anhang B.
[262] Mittags gibt es zusätzlich eine einzelne Fahrt von Karjaa nach Helsinki.

Anzahl der Streckengleise. Im viergleisigen Abschnitt nutzen die viele Zwischenhalte auslassenden Fahrten die Fernbahngleise, an denen es überwiegend keine Bahnsteige gibt, so dass die Zahl der betrieblich ausgelassenen Zwischenhalte kleiner ist als in der Fahrgastwahrnehmung. Die Strecke führt weiter nach Turku und wird im Personenfern- und Güterverkehr genutzt. (o.A. 2011e, S. 14) Infrastrukturell ist dieser Korridor mit bis zu 180 km/h befahrbar. (o.A. 2011c, S. 14ff.) Die jedoch nahezu ausschließlich eingesetzten Fahrzeuge des Typs Sm1-2 dürfen allerdings bauartbedingt maximal 120 km/h schnell fahren.[263]

Die Strecke des *blauen* Korridors ist 71 km lang und verlässt Helsinki in nordwestlicher Richtung. Auf dieser nach Riihimäki führenden Strecke verkehren sechs Zuggruppen. Mit Tikkurila und Kerava gibt es zwei Zwischenendpunkte. Am zentrumsnahen Streckenanfang verkehren im Tagesverlauf 205 Zugpaare. Das andere Ende des Korridors wird durchgehend mit zwei Zugpaaren pro Stunde befahren, so dass sich hier 44 Zugpaare pro Tag ergeben. Die Verdichtung auf diesem Korridor erfolgt durch eine Erhöhung der Taktdichte. Ferner wird das Halteschema verändert, so dass sich nur an einem Teil der Stationen ein dichteres Zugangebot ergibt. Etwa die Hälfte aller Stationen behält ihre den ganzen Tag über bestehende Angebotsdichte. Der Median des Quotienten der Stationsbedienung liegt auf diesem Korridor bei 1,5. Im Außenbereich werden die Stationen überwiegend unregelmäßig bedient. An den Stationen zwischen Kerava und Tikkurila sowie Tikkurila und Pasila ergibt sich ein gleichmäßiges Angebot, da hier die unregelmäßig verkehrenden langlaufenden Züge die Ferngleise nutzen und nicht halten. Die Strecke ist bis nach Kerava viergleisig, anschließend bis Riihimaki zweigleisig. (o.A. 2011c, S. 7) Sie dient neben den Zügen des Vorortverkehrs auch dem Fern- und Güterverkehr. (o.A. 2011e, S. 14) Die Ferngleise dieses Korridors, die von den Zügen mit wenigen Zwischenhalten (Linien R, H und Z) mitgenutzt werden, haben eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h. Auf den Nahverkehrsgleisen sind maximal 120 km/h zulässig. Zum Einsatz kommen neben der Baureihe Sm1-2 auch Fahrzeuge der Baureihe Sm4, die eine Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h haben.[263]

Auf den Fernverkehrsgleisen gibt es auf dem *blauen* und *grünen* Korridor weitgehend keine Bahnsteige an den durchfahrenen Stationen. Im Störungsfall nutzen die Züge je nach Betriebslage alle Gleise einer Richtung flexibel, weshalb aufgrund fehlender Bahnsteige mitunter Zwischenhalte ausgelassen werden müssen.[264]

Auf dem nur 15 km langen zweigleisig ausgebauten *gelben* Korridor von Helsinki nach Vantaankoski gibt es im Fahrtenangebot weder eine Unterscheidung zwischen Spitzenstunden und

[263] Aussage von Mikko Linderoos, Projektleiter Business Development, Passenger Services bei VR-Group Ltd. per E-Mail am 2014-01-13.

[264] Aussage von Mikko Linderoos, Projektleiter Business Development, Passenger Services bei VR-Group Ltd. per E-Mail am 2013-06-04.

dem restlichen Tagesverlauf noch unterschiedliche Stationsbedienungen. Zwischen 5:30 und 19:00 Uhr verkehren die Züge in beide Richtungen alle zehn Minuten und bedienen dabei alle Zwischenhalte. In den restlichen Zeiten des Tages variiert die Taktdichte zwischen 15 und 30 Minuten. Eine Verdichtung zur Abdeckung erhöhter Nachfrage in den Spitzenstunden erfolgt auf diesem Korridor allein über den Fahrzeugeinsatz. Durch den Einsatz von Mehrfachtraktionen ergibt sich ein Quotient des Platzangebotes von 1,77. Die Höchstgeseschwindigkeit auf diesem Korridor beträgt 120 km/h. (o.A. 2011c, S. 14ff.)

Auch der bis Kerava mit dem *blauen* Korridor vereinte nordöstliche *rote* Korridor von Helsinki nach Lahti wird ganztägig gleichartig bedient. Die zu diesem Korridor gehörenden Fahrten mit dem Kennbuchstaben Z verkehren von morgens bis abends im Stundentakt und bedienen stets dieselben Stationen. Eine Fahrt in der Spitzenstunde[265] wird in Doppeltraktion gefahren, so dass der Quotient des Platzangebotes 1,5 ergibt. Überlagert werden die Fahrten bis Kerava von den Zügen des *blauen* Korridors sowie bis Lahti von Zügen des Fernverkehrs, die weniger Stationen bedienen. Die Höchstgeschwindigkeit auf diesem Korridor beträgt 220 km/h. (o.A. 2011c, S. 14ff.) Es gelten jedoch die bereits auf den anderen Korridoren genannten Einschränkungen aufgrund der fahrzeugseitigen Höchstgeschwindigkeiten, so dass die Nahverkehrszüge maximal 160 km/h schnell fahren. Auf dieser Strecke gibt es mit 87,2 km zwischen Kerava und Lahti den größten Halteabstand. Der Median liegt dennoch bei 1,87 km.

Tabelle 4.3.1: Zugstärkenänderung im Vorortverkehr Helsinki zwischen HVZ und NVZ.

Strecken	Quotient der Zugstärkenänderung pro Strecke	Max. Platzangebot HVZ	Max. Platzangebot NVZ
Karjaa - Kirkkonummi	0	573	0
Kirkkonummi - Pasila	3	573	191
Pasila - Helsinki	2.2	573	260
Vantaankoski - Helsinki	2.2	573	260
Riihimäki - Käpylä	2	456	228
Käpylä - Helsinki	2.2	573	260
Lahti - Kerava	2	228	114
Kerava - Käpylä	2	456	228
Käpylä - Helsinki	2.2	573	260

Wie Tabelle 4.3.1 und Abbildung 4.3.2 zeigen, erfolgt die Verdichtung des Verkehrsangebotes einerseits über eine Erhöhung der Zugfahrten und gleichzeitig über eine deutliche Erhöhung des Platzangebotes in den Zügen.[266] So verkehren auf den meisten Fahrten im Grundangebot

[265] Aufgrund der stündlichen Bedienung ergibt sich so eine verstärkte und eine nicht verstärkte Stunde.

[266] Im gelben Korridor wird bei gleichem Takt ausschließlich über die eingesetzten Formationen verdichtet. Siehe auch Abbildung 4.3.4 sowie weitere Streckendiagramme im Anhang A.3 auf Seite A-23.

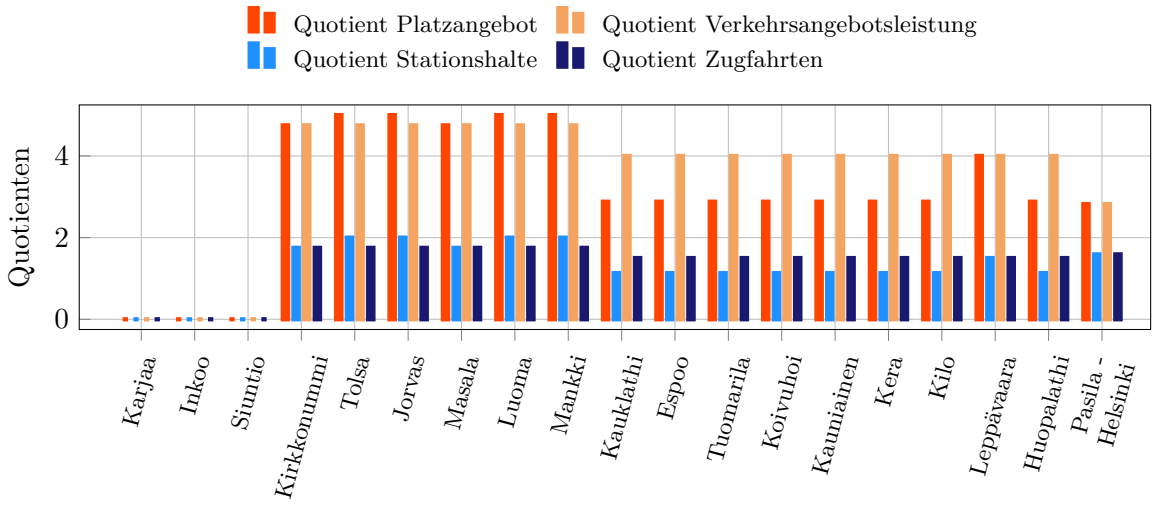

Abbildung 4.3.2: Quotienten im grünen Korridor des Nahverkehrs Helsinki.

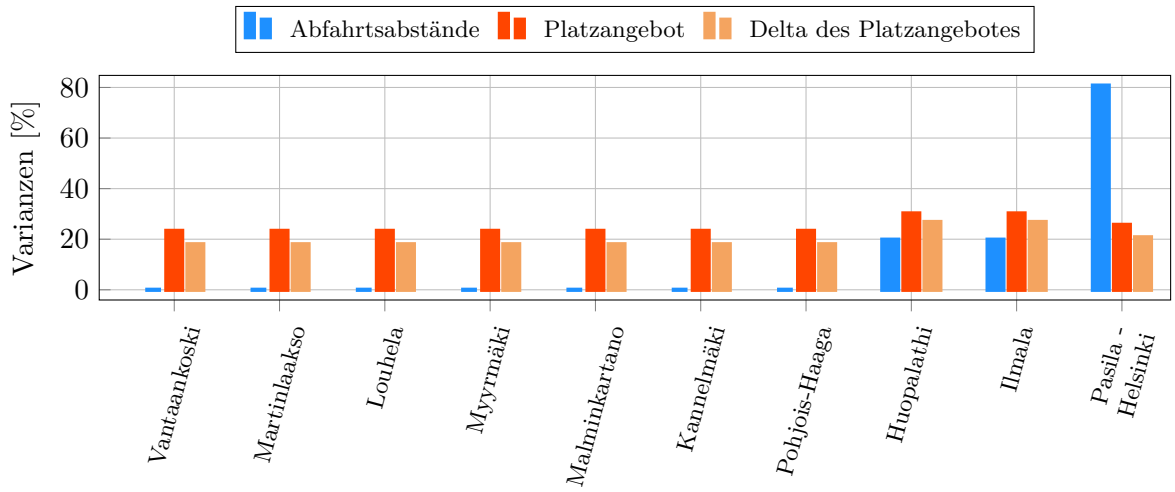

Abbildung 4.3.3: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast nach Vantaankoski in der HVZ.

einzelne Triebwagen, während in der HVZ mitunter in Vierfachtraktion gefahren wird. Da ein sehr heterogener Fahrzeugpark mit drei miteinander nicht kompatiblen Baureihen[267] eingesetzt wird, ergeben sich teilweise bei allen Fahrten einer Linie in den Spitzenstunden unterschiedliche Platzangebote.[268] Nur auf der Linie des roten Korridors von Lahti nach Helsinki gibt es auf den stündlichen Fahrten innerhalb der HVZ das gleiche Angebot.

Tabelle 4.3.2: Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in Helsinki.

Bezeichnung	Sitzplätze	Traktion	Masse [t]	V_{max} [km/h]	Länge [m]	Cluster Referenzfahrzeuge
Sm4 (Doppeltraktion)	228	Elektro	188	160	106	NV 150 E (2), NV 150 E (2)
Sm5	260	Elektro	132	160	75	NV 200 E (3)
Sm4 (Dreifachtraktion)	342	Elektro	282	160	159	NV 150 E (2), NV 150 E (2), NV 150 E (2)
Sm1/2 (Doppeltraktion)	382	Elektro	188	120	107	NV 150 E (2), NV 150 E (2)
Sm4 (Vierfachtraktion)	456	Elektro	376	160	212	NV 150 E (2), NV 150 E (2), NV 150 E (2), NV 150 E (2)
Sm5 (Doppeltraktion)	520	Elektro	264	160	150	NV 200 E (3), NV 200 E (3)
Sm1/2 (Dreifachtraktion)	573	Elektro	282	120	160	NV 150 E (2), NV 150 E (2), NV 150 E (2)

Die Verkehre sind auf Helsinki ausgerichtet. Eine Änderung der Zugstärke findet innerhalb des Nahverkehrsnetzes im Fahrtverlauf nicht statt.[269]

[267] Es sind die in Tabelle 4.3.2 dargestellten Formationen. Vgl. dazu auch Linderoos (2009, S. 29) und o.A. (2008d).

[268] Siehe Abbildung 4.3.3 für die Linie Vantaankoski - Helsinki.

[269] Einzelne Züge der Linie R verkehren über Riihimäki hinaus als Fernverkehrszug weiter nach Tampere. Diese Züge werden in Riihimäki geschwächt. Fahrten entgegen der Lastrichtung verkehren (abgesehen von einzelnen Einsetzfahrten am Morgen) als Fahrgastfahrten mit identischer Haltebedienung wie in Lastrichtung.[263] .

Die in Tabelle 4.3.3 dargestellten Reisezeitgewinne durch das Auslassen von Zwischenhalten zeigen, dass es einige Fahrten gibt, die eine größere Anzahl an Zwischenhalten auslassen. So ergibt sich ein Reisezeitgewinn von bis zu vier Minuten pro ausgelassenem Halt. Der Median liegt bei einer Minute.

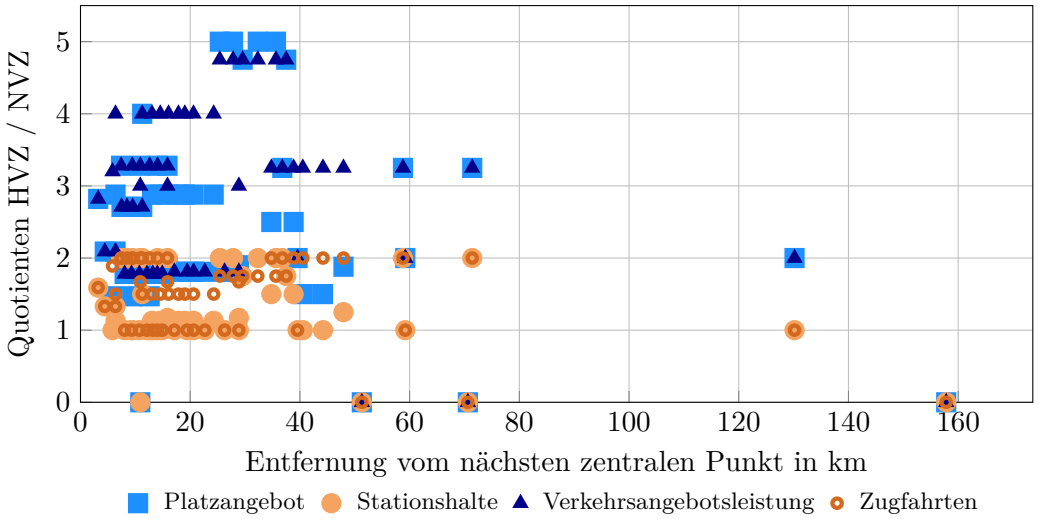

Abbildung 4.3.4: Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten in Helsinki.

Abbildung 4.3.4 zeigt die gemäß der Definitionen in Kapitel 3.2 bestimmten Quotienten für sämtliche Stationen des Netzes. Größere Differenzierungen sind überwiegend nur auf dem *grünen* und *blauen* Korridor zu finden. Die Quotienten mit Wert 0 resultieren aus dem Abschnitt Karjaa - Kirkkonummi, der nur in der HVZ befahren wird. Auffällig ist die Zahl der Stationen ohne nennenswerte Veränderung der Stationshalte in der HVZ, wenngleich auf beiden Korridoren die Anzahl der Zugfahrten je nach Streckenabschnitt deutlich um 25 bis 100 Prozent erhöht wird. Dies ist die Folge der in den Abbildungen 4.3.5 und 4.3.6 ersichtlichen Haltestellenbedienung, die auf dem *blauen* und *grünen* Korridor weitgehend dem von Vuchic (1981, S. 65) beschriebenen *zonal service* mit abschnittsweisem Auslassen von Zwischenstationen entspricht.[270] Auf allen Abschnitten erfolgt eine nennenswerte Ausweitung des Platzangebotes.[271] Diese bewegt sich als Quotient zwischen 0 im außerhalb der HVZ nicht befahrenen Abschnitt ab Karjaa bzw. 1,5 auf dem *roten* Korridor und 5 im *grünen* Korridor zwischen Kirkkonummi und Kauklaht. Der Median liegt bei 3.

[270] Vgl. Abbildunden 3.2.3 bis 3.2.5 auf Seite 46.

[271] Der einzelne Quotient des Platzangebotes, der null beträgt, und bei etwa 10 km Entfernung von Helsinki liegt, resultiert aus den ausschließlichen Expressfahrten auf dieser Strecke sowohl in der HVZ als auch der NVZ, da beide benachbarten Halte von Zügen der parallel verlaufenden Strecke bedient werden.

Die Länge der Fahrten mit unterschiedlichen Endbahnhöfen auf den einzelnen Korridoren bewegt sich zwischen 11,25 km (Leppävaara) und 157,82 km (Karjaa) (o.A. 2011c, S. 48ff.). Sie liegt im Median bei 15,86 km. Fünf der neun Endbahnhöfe sind Zwischenendstellen, einzig auf dem Ast nach Vantaankoski gibt es keine Zwischenendstelle.

Tabelle 4.3.3: Reisezeitgewinne im Großraum Helsinki in der morgendlichen HVZ stadteinwärts.

Anzahl Fahrten	Abschnitt	t (m. Halt)	t (o. Halt)	Δ Halte	$\Delta t_{R,abs}$	η_D
1	Hyvinkää - Pasila	46	32	7	14	0.54
2	Hyvinkää - Pasila	51	36	9	15	0.69
2	Tikkurila - Pasila	15	9	2	6	0.15
2	Tikkurila - Pasila	15	10	2	5	0.25
3	Jokela - Pasila	34	24	6	10	0.46
12	Puistola - Pasila	14	11	3	3	0.21
3	Kirkkonummi - Pasila	39	28	12	11	0.63

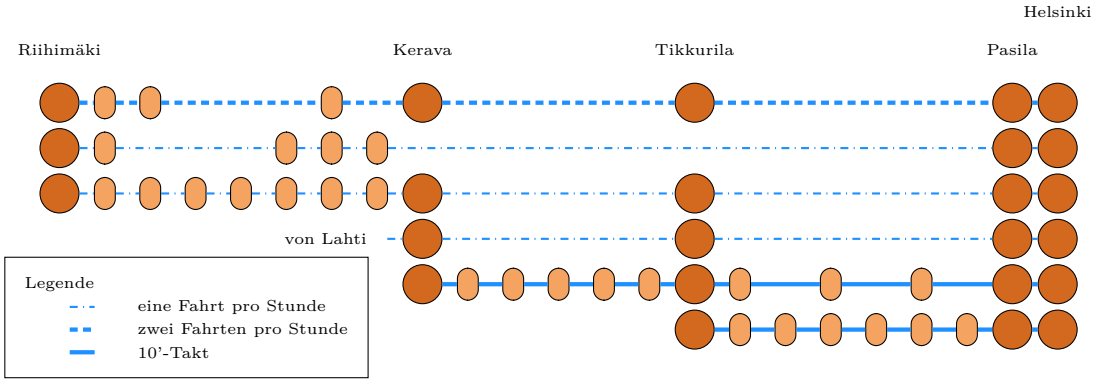

Abbildung 4.3.5: Fahrtengefüge stadteinwärts im blauen Korridor in Helsinki in der morgendlichen HVZ [eigene Darstellung nach Fahrplandaten aus VR (2011)].

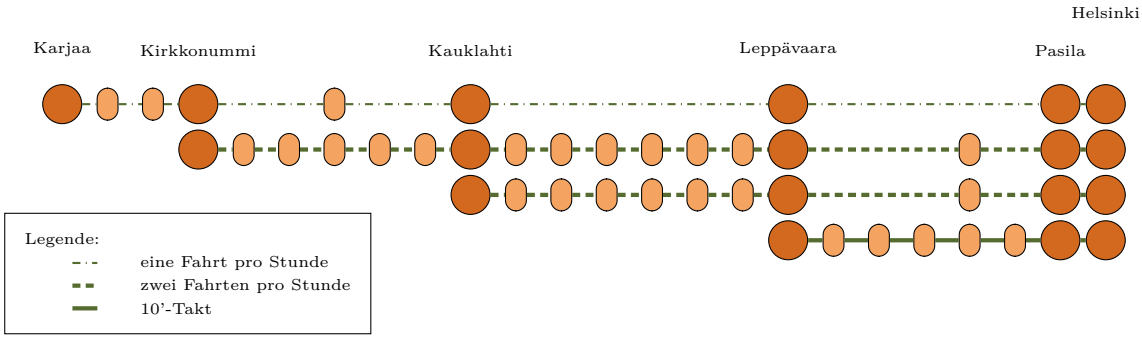

Abbildung 4.3.6: Fahrtengefüge stadteinwärts im grünen Korridor in Helsinki in der morgendlichen HVZ [eigene Darstellung nach Fahrplandaten aus VR (2011)].

Die Abbildungen 4.3.7 bis 4.3.9 sowie die Tabellen 4.3.4 bis 4.3.6 fassen alle zusammengestellten Vergleichsparameter für den Nahverkehr im Großraum Helsinki zusammen. Dabei zeigt

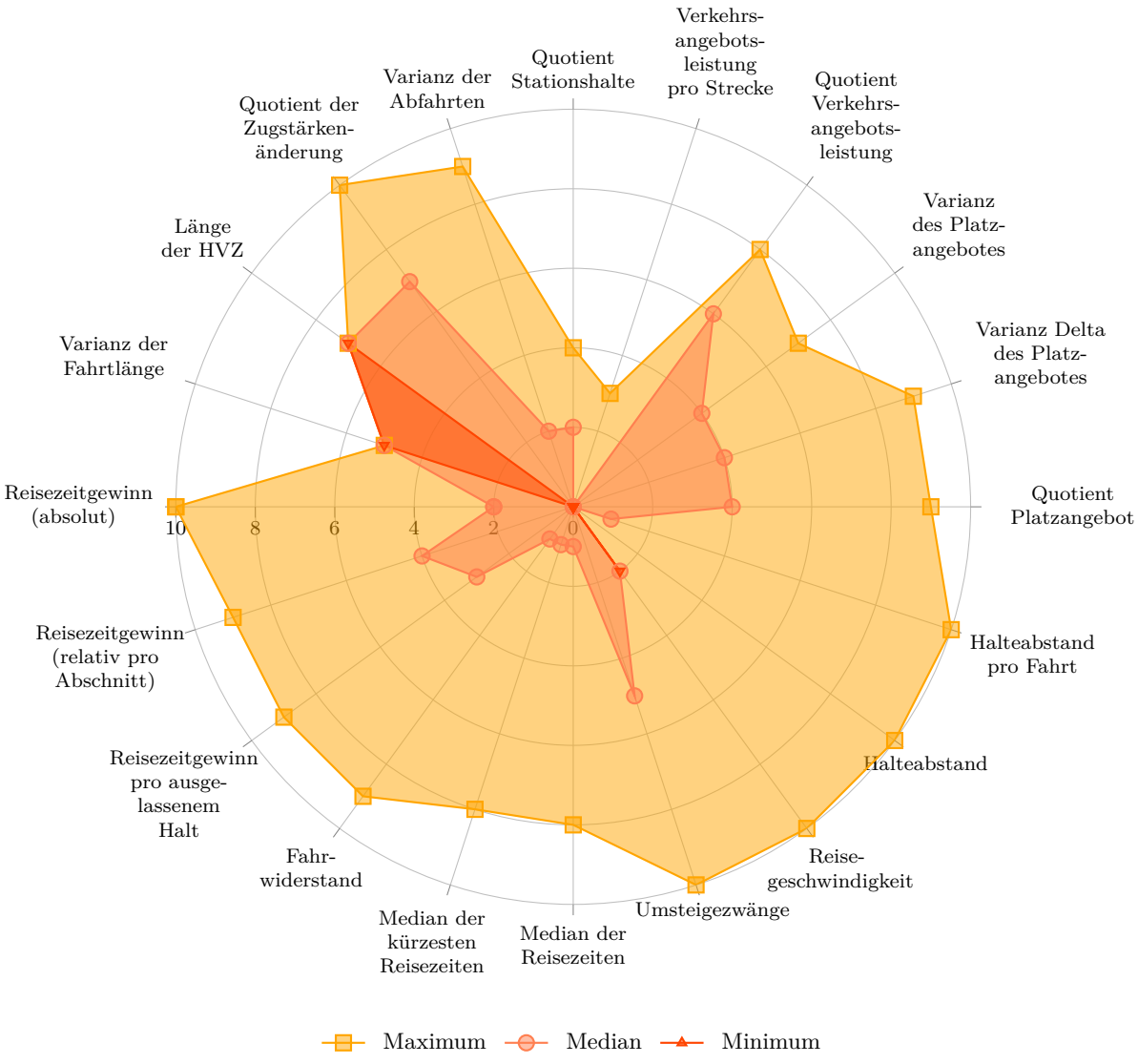

Abbildung 4.3.7: Verkehrliche Vergleichsparameter Nahverkehr im Großraum Helsinki.

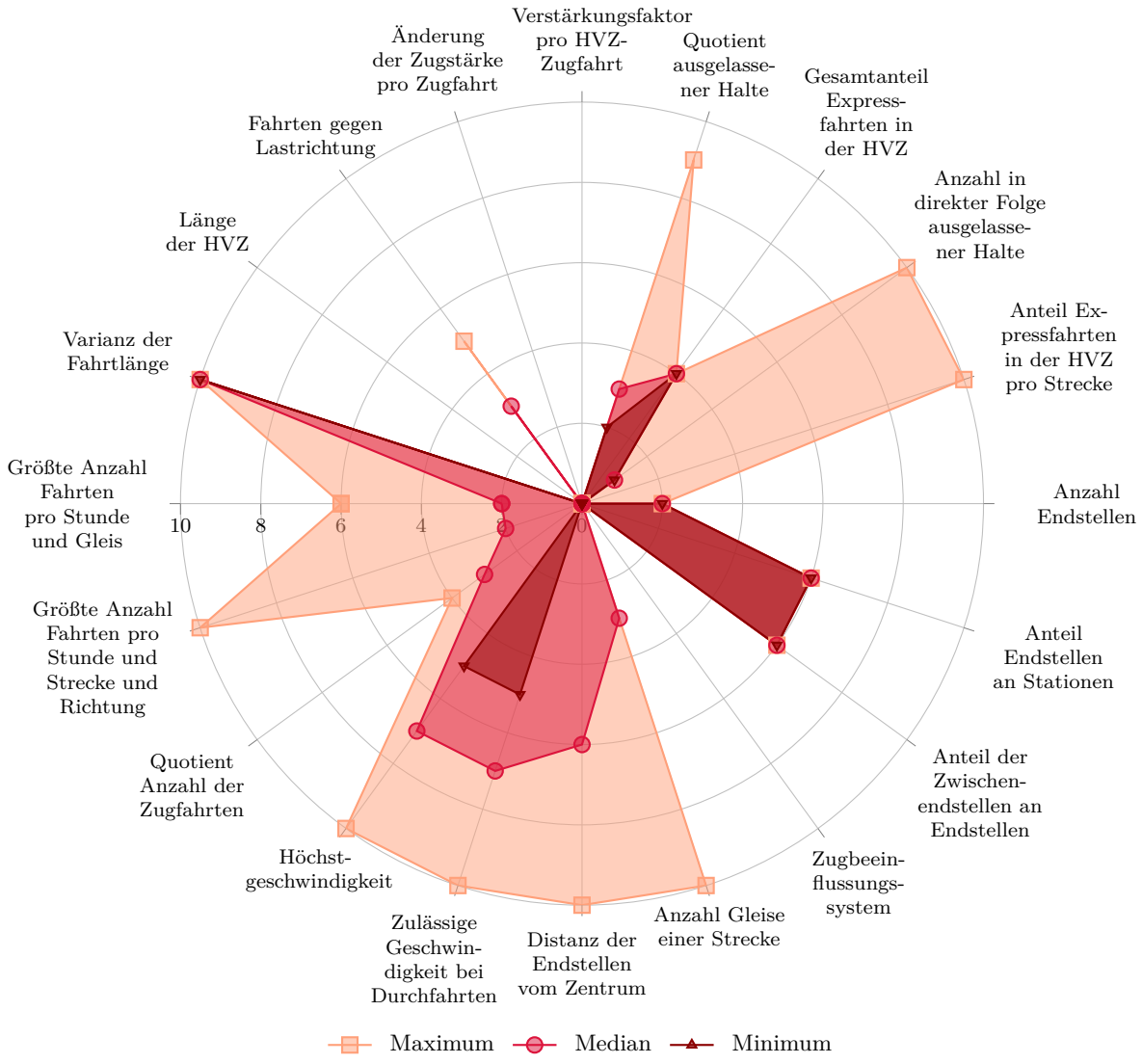

Abbildung 4.3.8: Betriebliche Vergleichsparameter Nahverkehr im Großraum Helsinki.

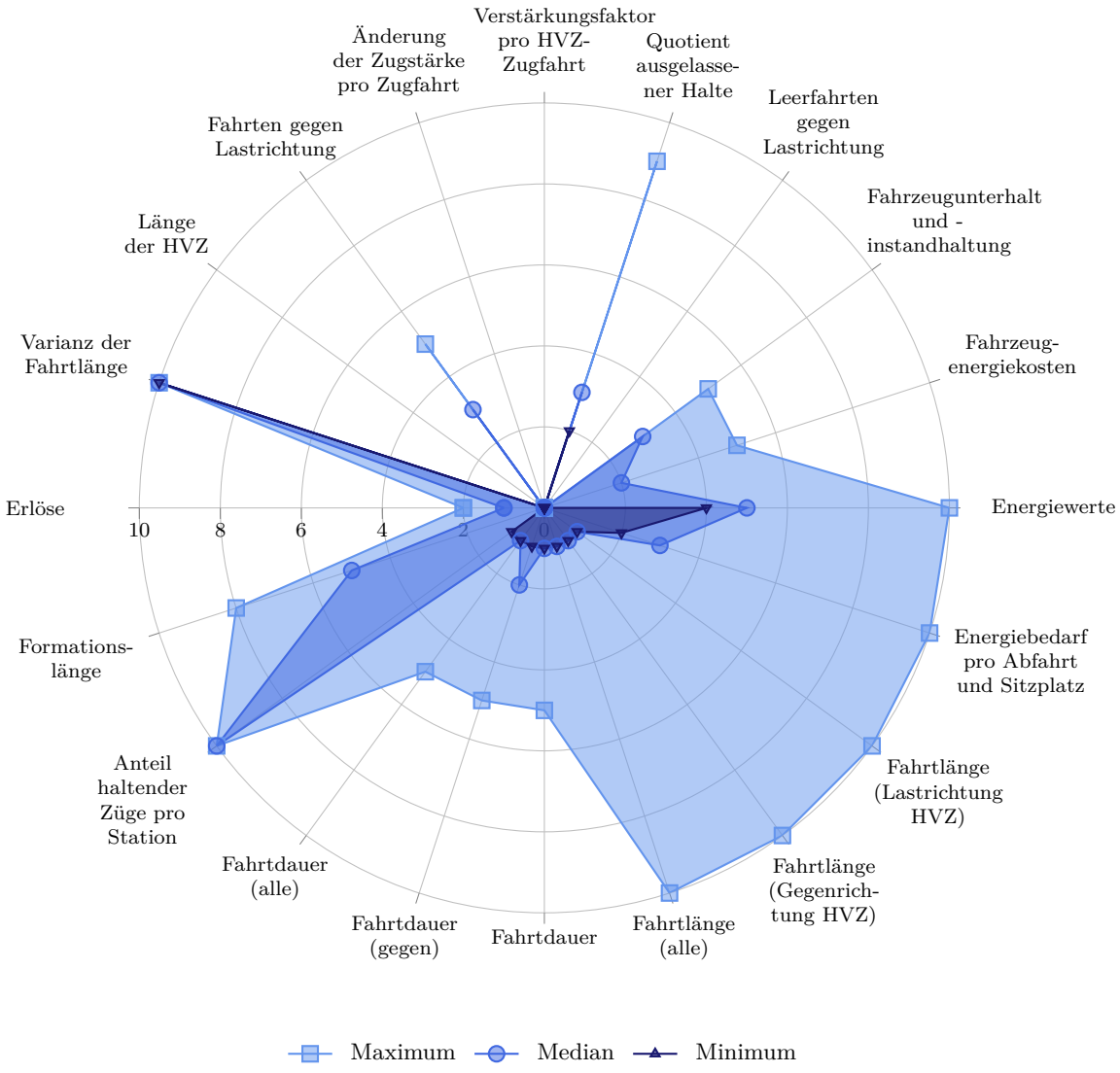

Abbildung 4.3.9: Wirtschaftliche Vergleichsparameter Nahverkehr im Großraum Helsinki.

sich insbesondere in verkehrlicher Hinsicht eine starke Ausdifferenzierung, da in den meisten erhobenen Parametern in diesem Netz hohe Punkte erzielt werden. Durch die Linie des *roten* Korridors nach Lahti ergibt sich ein sehr heterogenes Bild mit hohen, ausreißenden Werten beispielsweise bei dem Halteabstand und der Distanz der Endstellen. Der Median dieser Werte zeigt jedoch auch, dass die verkehrliche Bedeutung dieser Strecke verglichen mit den stärker befahrenen kürzeren Relationen gering ist.

Tabelle 4.3.4: Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien für den Nahverkehr im Großraum Helsinki.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrwiderstand [EUR/Platz-h]	L_i	0	6	43
Halteabstand [km]	l_H	0,82	1,87	87,20
Mittlerer Halteabstand pro Fahrt [km]	$\overline{l_H}$	1,49	1,98	22,55
Median der kürzesten Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,k}}$	1	31	174
Median der Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,g}}$	1	20	174
Reisezeitgewinn (absolut) [Min.]	$\Delta T_{R,abs}$	0	2	12
Reisezeitgewinn (relativ, pro Abschnitt) [%]	$\Delta T_{R,rel}$	0	22	47
Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt [Min.]	t_{aH}	0	1	4
Reisegeschwindigkeit pro Fahrt [km/h]	v_R	39,70	43,26	139,25
Umsteigezwänge	N_U	0	1	2
Quotient der Zugstärkenänderung	η_{ZG}	0	2	3
Quotient Platzangebot	η_P	0	3	5
Quotient Stationshalte	η_S	0	1	2
Quotient der Verkehrsangebotsleistung	η_V	0	3	5
Varianz des Deltas des Platzangebotes [%]	$\nu_{\Delta P}$	0	13	27
Varianz der Abfahrten [%]	ν_Z	0	20	81
Varianz des Platzangebotes [%]	ν_P	0	17	32
Verkehrsangebotsleistung pro Strecke [10^3 Platzkm]	P_V	2,04	5,52	74,95

Tabelle 4.3.5: Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für den Nahverkehr im Großraum Helsinki.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde und Gleis [pro h und Gleis]	$N_{ZZ,G,max}$	1	6	18
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde, Strecke und Richtung [pro h und Richtung]	$N_{ZZ,S,max}$	1	6	35
Quotient Anzahl der Zugfahrten	η_F	0	2	2
Anzahl Gleise einer Strecke	N_G	1	2	4
Distanz der Endstellen vom Zentrum [km]	l_N	14,91	100,79	157,82
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	v_{max}	100	120	160
Zugbeeinflussungssystem	ZUB		1.000	
Zulässige Geschwindigkeit bei planmäßigen Durchfahrten [km/h]	$v_{max,D}$	120	160	200
Änderung der Zugstärke pro Zugfahrt	N_{ZH}	0	0	0
Anteil der Zwischenendstellen an Endstellen [%]	η_{ZE}		55,56	
Anteil Endstellen an Stationen [%]	η_E		16,36	
Anteil Expressfahrten in der HVZ pro Strecke [%]	$\eta_{Ex,S}$	0,00	0,00	100,00
Anzahl Endstellen	N_E		9	
Anzahl in direkter Folge ausgelassener Halte	N_D	1	1	9
Quotient Zugfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,G}$	0	1	2
Gesamtanteil Expressfahrten in der HVZ [%]	η_{Ex}		35,71	
Länge der HVZ [h]	t_{HVZ}		2	
Quotient ausgelassener Halte	η_D	0,15	0,21	0,69
Varianz der Fahrtlänge [%]	ν_N		104,00	
Verstärkungsfaktor pro HVZ-Zugfahrt	l_{ZH}	1	1	1

Tabelle 4.3.6: Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien für den Nahverkehr im Großraum Helsinki.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrterlöse [EUR/Zugkm]	E	43,32	72,58	108,87
Formationslänge [m]	l_{Zug}	75	150	212
Anteil haltender Züge pro Station [%]	η_{DH}	0,25	1,00	1,00
Energiebedarf pro Abfahrt und Sitzplatz [kJ/Platz]	$E_{B,S}$	9,57	13,78	41,04
Energiebedarf pro Abfahrt und Zuglängenmeter [kJ/m]	$E_{B,Z}$	34,12	49,42	88,43
Fahrtdauer (Last- und Gegenrichtung HVZ) [Min.]	t_{Fahrt}	17	22	72
Fahrtdauer (Gegenrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,G}$	17	22	61
Fahrtlänge (Last- und Gegenrichtung HVZ) [km]	l_{Fahrt}	11	16	158
Fahrtlänge (Gegenrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,G}$	11	16	130
Fahrtlänge (Lastrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,L}$	11	16	158
Fahrtdauer (Lastrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,L}$	17	22	72
Fahrzeugunterhalt und -instandhaltung [EUR/km]	K_{FZ}	0,82	1,64	2,40
Energiekosten [EUR/km]	K_E	0,64	1,28	2,12
Quotient der Leerfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,GL}$	0	0	0

4.4. DSB S-tog Kopenhagen

Die dänische Hauptstadtregion auf der Insel Seeland ist - zusammen mit dem auf der anderen Seite des Öresunds liegenden schwedischen Malmö - der größte Ballungsraum der Region. Das Stadtzentrum befindet sich im Bereich zwischen den Bahnhöfen Dybbølsbro und Østerport im Bereich der Stammstrecken, an der sich auch die verkehrsreichen Stationen Hauptbahnhof und Nørreport befinden.

Die Stadtentwicklung der Hauptstadtregion orientiert sich seit fast einem Jahrhundert an einem Grundkonzept, das im Jahr 1926 durch die vom dänischen Ingenieurverein initiierte *Verkehrslinienkommission* entworfen wurde. (Priebs 2007, S. 271) Kernelement dieses sogenannten *Fingerplans* war die Definition von fünf radialen Achsen, entlang derer die urbane Entwicklung stattfinden sollte.[272] Dabei sollten Arbeitsplätze primär im Zentrum und Wohnsiedlungen vor allem in den Außenbezirken entstehen. Die Freiflächen zwischen diesen *Fingern* waren zur Naherholung und Aufforstung vorgesehen. Auf diesem Grundkonzept basierend wurde 1934 die Kopenhagener S-Bahn geschaffen, um nach und nach genau diese fünf Radialen zu befahren. Dieser Plan überstand verschiedene Epochen mit starkem Wachstum, Bevölkerungsrückgang und sich wandelnden Politikeinflüssen und wurde 2007 zum vierten Mal fortgeschrieben. (Priebs 2007, S. 271)

Die sechs in Abbildung 4.4.1 dargestellten Radialen des mit Gleichstrom elektrifizierten S-Bahnnetzes - Anfang der 1980er Jahre wurde im Süden ein sechster Finger ergänzt - sind in der Innenstadt durch eine Stammstrecke verbunden. Je drei Streckenäste liegen nördlich und südwestlich der Stammstrecke, auf der in der HVZ 30 Züge pro Stunde und Richtung verkehren. Dazu gibt es die schon 1934 in ihrem nördlichen Teil und in den 2000er Jahren in den Süden zu einem Halbring verlängerte Ringbahn, die nun alle Radialäste miteinander verbindet. (Priebs 2007, S. 273) Abgesehen von einem kurzen Abschnitt vor dem Endbahnhof Farum sind alle Strecken zweigleisig und stehen derzeit exklusiv den von den Danske Statsbaner (DSB) betriebenen S-tog-Zügen zur Verfügung. (Makholm 2012) Die Streckenäste sind ausgehend vom Kopenhagener Hbf zwischen 13,3 und 41,8 km lang. (o.A. 2015c, S. 221ff.) Der Median der Fahrtlänge liegt bei 38,5 km. Die Außenäste weisen jeweils eine oder keine Zwischenendstelle auf.[273] Der Anteil von 50 Prozent der Zwischenendstellen an der Gesamtzahl von zwölf Endbahnhöfen zeigt, dass es vielfach eine lange Linie bis zum Streckenende und eine sie verstärkende Linie bis zum Zwischenendpunkt gibt.[274] Es sind Geschwindigkeiten bis 120 km/h

[272] Priebs (2007, S. 271) schreibt, dass der Ursprungsplan einen 1-km-Radius um die S-Bahnhöfe zur Stadtentwicklung vorsah.

[273] Auf dem Ast nach Køge gibt es zwei Zwischenendstellen, von denen jedoch tageszeitabhängig jeweils nur eine benutzt wird.

[274] Der zugrunde liegende Fahrplan stammt aus o.A. (2013b).

Abbildung 4.4.1: Liniennetzplan von DSB S-tog Kopenhagen.

zulässig, im Innenstadtbereich auf der Stammstrecke beträgt die zulässige Höchstgeschwindigkeit abschnittsweise nur 40 km/h. (o.A. 2015c, S. 221ff.) Das Zugbeeinflussungssystem ist ein eigens für dieses Netz in den 1970er Jahren entwickeltes Linienleitersystem mit kontinuierlicher Beeinflussung und Führerstandsignalisierung.[275] Das System umfasst nicht alle Außenstrecken, so dass teilweise nur die Fahrt auf ortsfeste Signale möglich ist.[276] (Schittenhelm 2011, S. 8) Seit 2016 wird dieses System mit dem Ziel eines automatischen Betriebes schrittweise durch das System Trainguard MT von der Firma Siemens ersetzt. (Zoefeld 2016)

Bei der Kopenhagener S-Bahn gibt es nachweisbar seit den 1960er Jahren eine Überlagerung von mehreren Linien auf den meisten Streckenästen.[277] (Juhnke 1966a, S. 96) Dabei bedient eine Linie in der Regel alle Zwischenstationen, eine zweite Linie lässt Unterwegsstationen aus. So gibt es Stationen, die in den Verkehrszeiten beider Linien eine Angebotsverdichtung erfahren und kleinere Stationen, in denen das Grundangebot bestehen bleibt, weil die Verstärkungszüge durchfahren.

Abbildung 4.4.2 zeigt beispielhaft für den Streckenast Hillerød - Svanemøllen die Struktur der Stationsbedienung. Die Linie E verkehrt von Hillerød in Richtung Innenstadt, bedient dabei bis Holte alle Zwischenstationen, ab dort jedoch nur die aufkommenstarken Stationen Lyngby und Hellerup[278]. In Holte setzt zusätzlich die Linie B ein, die von dort ab alle Zwischenstationen bis zur Innenstadt bedient. Durch Auslassen von Stationen gewinnen die Züge der Linie E pro Zwischenstation etwa eine Minute. Abbildung 4.4.3 stellt für diesen Streckenast die Fahrgastzahlen den Stationshalten pro Stunde und Richtung gegenüber. Die deutlich schwächere Nachfrage an den fünf von der Linie E durchfahrenen Stationen ist auffällig. Der Zwischenendpunkt Holte tritt jedoch nicht besonders hervor. Die sehr starke Nachfrage am Bahnhof Lyngby erklärt, weshalb dort auch die Züge der Linie E halten.[279] Dieses Prinzip entspricht weitgehend dem von Vuchic (1981, S. 65) beschriebenen *zonal service*.

Bei dieser Linienüberlagerung handelt es sich um eine Verdichtung des Verkehrsangebotes gegenüber einer Bedienung aller Äste mit nur einer Linie und Halt an allen Stationen. Mit

[275] HKT - Hastighedskontrol og togstop Aalb (2008, S. 2), frei übersetzt *Geschwindigkeitskontrolle und Zughalt*.

[276] Als Rückfallebene gibt es diese Möglichkeit im gesamten Netz mit stark verringerter Leistungsfähigkeit durch eine gröbere Blockteilung.

[277] Bei DSB S-tog und dem Infrastrukturbetreiber Banedanmark gibt es derzeit Überlegungen, von der abschnittsweisen Expressbedienung abzurücken und alle Stationen von allen auf einer Strecke verkehrenden Zügen bedienen zu lassen. Ein erster Betriebsversuch wurde im Herbst 2011 auf der Strecke nach Høje Taastrup durchgeführt. (Schouboe Sloth 2011) Durch den dann dichteren Takt gäbe es gemessen an der Frequenz eine Angebotsverbesserung. Für Reisende auf Relationen aus und zwischen den Außenbezirken ergäben sich jedoch Fahrzeitverlängerungen.

[278] Hellerup ist der Umsteigebahnhof zur Tangentiallinie sowie der Verzeigungsbahnhof zum Streckenast nach Klampenborg.

[279] Die Zahlen zur Station Hellerup beinhalten alle DSB S-tog-Fahrgäste an dieser Station, so dass der auf die Linien B und E entfallene Teil wesentlich geringer sein dürfte.

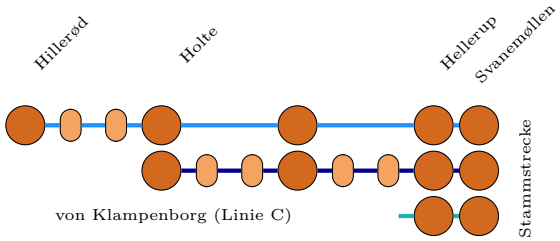

Abbildung 4.4.2: Netzausschnitt Hillerød - Svanemøllen stadteinwärts [eigene Darstellung auf Basis von o.A. (2013b)].

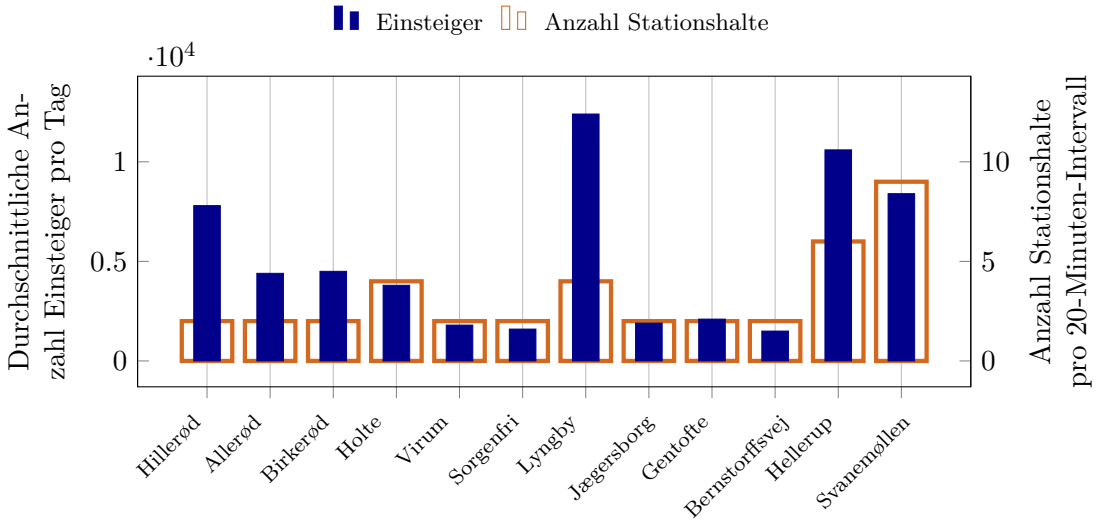

Abbildung 4.4.3: Fahrgastzahlen Hillerød - Svanemøllen [eigene Darstellung auf Basis von o.A. (2014c) und o.A. (2013b)].

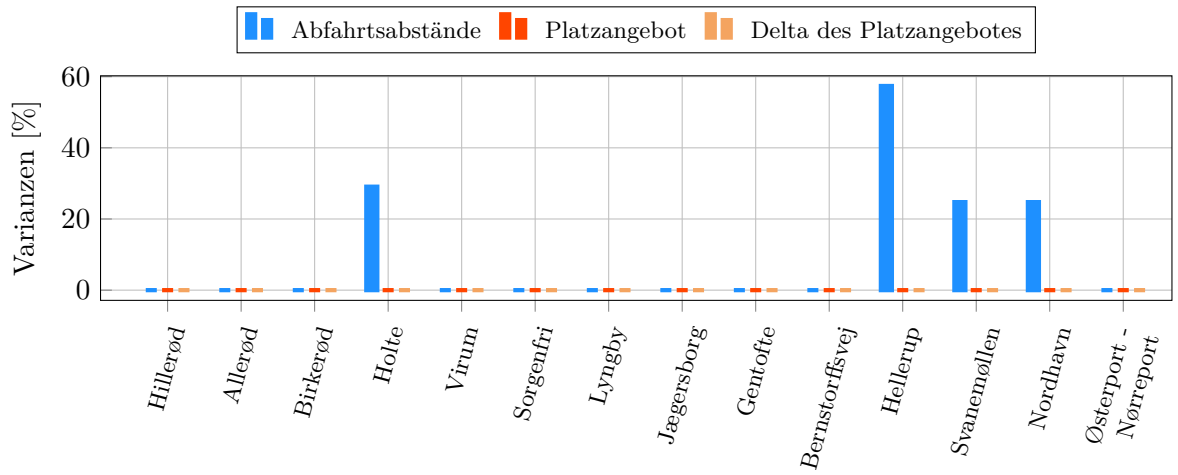

Abbildung 4.4.4: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Hillerød - Nørreport in der HVZ.

Ausnahme der nur mit vier Fahrten pro Richtung im Abstand von 20 Minuten am Morgen (in beide Richtungen) verkehrenden Linie Bx sowie einem Abschnitt der Linie H, der während zwei Stunden in der HVZ über die Stammstrecke hinaus bis Farum verlängert wird,[280] werden jedoch alle Linien ganztägig von Betriebsbeginn bis Betriebsschluss befahren. Es gibt folglich ganztags abschnittsweise Expressfahrten. Der Fahrplan sieht dabei so aus, dass die Expressfahrten jeweils direkt nach den überall haltenden Fahrten die Stammstrecke erreichen und beim Verlassen der Stammstrecke direkt vor den überall haltenden Fahrten verkehren. (o.A. 2013b) Am (Zwischen-)Endpunkt ergibt sich somit ein größerer Abstand zwischen den haltenden und den abschnittsweise als Express verkehrenden Linien.[281] Im Gegensatz zu dem in Aalb (2008, S. 13) beschriebenen möglichen zukünftigen Betriebskonzept mit einer zweiten innerstädtischen Stammstrecke gibt es im DSB S-tog-Netz planmäßig keine Überholungen. Somit ist der mögliche Reisezeitgewinn der abschnittsweisen Expresszüge begrenzt. Da auf mehreren Außenästen zwei Linien überlagert verkehren, ergibt sich - verstärkt durch die abschnittsweisen Expressfahrten - an vielen Stationen eine sehr große Unregelmäßigkeit der Abfahrten. Die Varianz der Abfahrtsabstände beträgt bis zu 57,38 Prozent. Der Median zeigt jedoch eine gleichmäßige Abfahrtsverteilung an der Mehrheit der Stationen.

Der Fahrzeugpark besteht aus zwei Baureihen, sogenannten vierteiligen Halbzügen Litra SE und achtteiligen Vollzügen Litra SA. (o.A. 2007a) Beide Baureihen lassen sich in zu jeweils zwei Einheiten kuppeln, wobei die Varianten mit einem oder zwei SE nur auf der Linie F sowie die übrigen Kombinationen aus einem SA, einem SA und einem SE sowie zwei SA nur auf den

[280] Auf diesem Ast verkehrt sie dann auch als Expresslinie.
[281] Vgl. Abbildung 4.4.4.

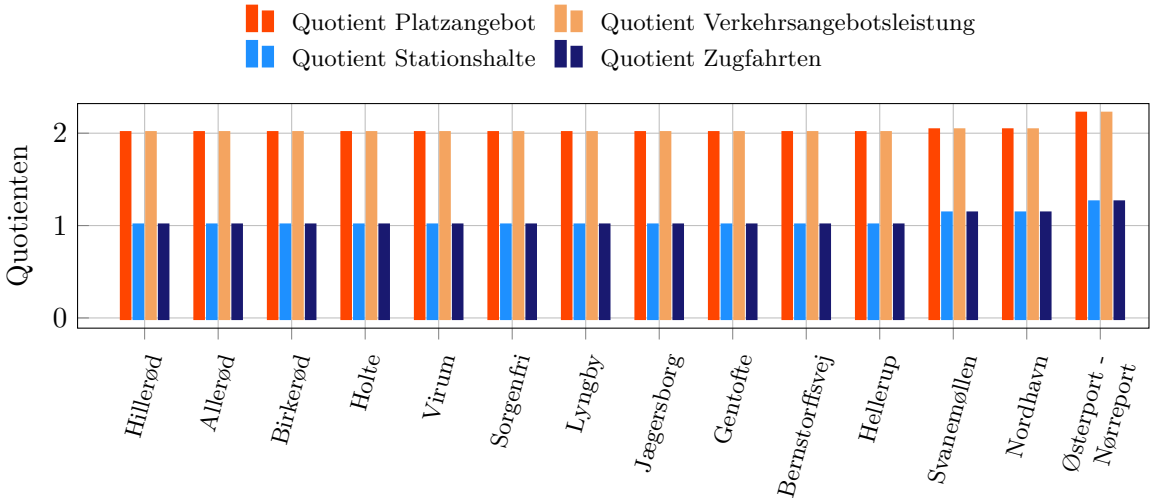

Abbildung 4.4.5: Quotienten auf dem Ast Hillerød - Nørreport in der HVZ.

übrigen Linien zulässig sind. (Thorlacius 2017, S. 45) Tabelle 4.4.1 zeigt die in der HVZ eingesetzten Formationen.

Tabelle 4.4.1: Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in Kopenhagen.

Bezeichnung	Sitzplätze	Traktion	Masse [t]	V_{max} [km/h]	Länge [m]	Cluster Referenzfahrzeuge
SE (Doppeltraktion)	250	Elektro	200	120	85	NV 100 E (1), NV 100 E (1)
SA+SE (Doppeltraktion)	425	Elektro	295	120	126	NV 250 E (4), NV 100 E (1)
SA (Doppeltraktion)	600	Elektro	390	120	168	NV 250 E (4), NV 250 E (4)

Die Erhöhung des Platzangebotes in nachfragestarken Zeiten erfolgt in Kopenhagen, abgesehen von den oben genannten Ausnahmen, allein über den Einsatz längerer Züge auf allen Linien, wie Abbildung 4.4.5 für den Streckenast ab Hillerød sowie Abbildung 4.4.6 für das Gesamtnetz zeigen. Dabei wird das Platzangebot auf allen Abschnitten mindestens um den Faktor 1,32 verstärkt, die Verkehrsangebotsleistung steigt minimal um den Faktor 1,65. Im Median erfolgt eine Verdoppelung des Platzangebotes bei einem Maximum auf dem Ast nach Høje Taastrup von 2,71. Eine Verdichtung der Zugfahrten gibt es nur auf den beiden oben genannten Abschnitten nach Farum und Høje Taastrup durch je eine zusätzliche Zuggruppe im

20-Minuten-Takt. Die Erhöhung des Platzangebotes erfolgt in Abhängigkeit der Fahrgastströme und unterliegt regelmäßigen Anpassungen: Auf stark frequentierten Fahrten werden zwei SA eingesetzt, auf weniger stark frequentierten Ästen verkehren ein SA und ein SE.[282] Diese deutlichen Verstärkungen sind in Abbildung 4.4.6 zu erkennen. Zuglängenänderungen finden ausschließlich an Endbahnhöfen statt und sind an Unterwegsbahnhöfen außer im Störungsfall betrieblich nicht zulässig. (Thorlacius 2013, S. 12) Sie werden damit lediglich am Übergang zwischen HVZ und NVZ durchgeführt.

Die Expressfahrten verkehren ebenso wie die überall haltenden Züge in beide Richtungen als Fahrgastfahrten, so dass es auch in diesem Aspekt keine Unterscheidung zwischen HVZ und dem übrigen Angebot gibt.

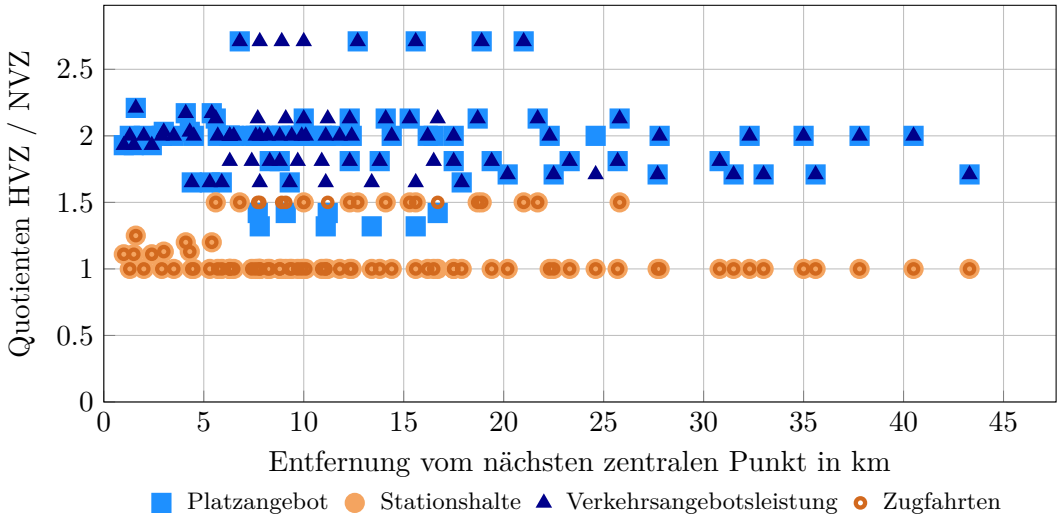

Abbildung 4.4.6: Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei DSB S-tog Kopenhagen.

Die Differenzierung des Halteregimes wird bei Betrachtung der Reisezeiten in Tabelle 4.4.2 erkennbar. Die Verkürzung der Reisezeit liegt zwischen 5 und 24 Prozent. Je ausgelassenem Halt reduziert sich die Reisezeit um durchschnittlich 0,91 Minuten. Die Expresszüge lassen zwischen 21 und 36 Prozent aller Halte im Fahrtverlauf aus.

Die gemäß Kapitel 3.2 ermittelten Parameter sind in den Abbildungen 4.4.7 bis 4.4.9 sowie Tabellen 4.4.3 bis 4.4.5 dargestellt. In der verkehrlichen Betrachtung zeigt sich auf den ersten Blick eine geringe Differenzierung. Bei genauerer Betrachtung ist jedoch auffällig, dass in diesem Netz die Minima der Quotienten des Platzangebotes, der Verkehrsangebotsleistung und der Zugstärkenänderung zwei Punkte erreichen und damit deutlich über den Minima der anderen

[282] Aussage per E-Mail von DSB S-tog, Abteilung Angebotsplanung, am 13. November 2013. Vgl. dazu auch die Untersuchungen von Thorlacius (2017).

Tabelle 4.4.2: Reisezeitgewinne bei DSB S-tog Kopenhagen durch Expressfahrten.

Anzahl Fahrten	Abschnitt	t (m. Halt)	t (o. Halt)	Δ Halte	$\Delta t_{R,abs}$	η_D
3	Glostrup - Danshøj	8.5	5	3	3.5	0.23
3	Veksø - Valby	19.5	15	6	4.5	0.26
3	Hareskov - Ryparken	13.5	10.5	4	3	0.27
6	Ishøj - Ny Ellebjerg	13.5	10	4	3.5	0.21
6	Holte - Hellerup	15	10.5	5	4.5	0.36

Netze liegen. Durch die große Zahl an Ästen ergeben sich auf vielen Relationen Umsteigezwänge, wobei nur etwa 10% der Fahrgäste tatsächlich innerhalb des S-Bahn-Netzes umsteigen.[283] Der Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt ist vergleichsweise hoch. In der betrieblichen Betrachtung stechen die Anzahlen an Fahrten pro Stunde heraus, die im Spitzenfeld liegen.

Tabelle 4.4.3: Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien für DSB S-tog in Kopenhagen.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrwiderstand [EUR/Platz-h]	L_i	0	5	15
Halteabstand [km]	l_H	0,50	1,40	8,60
Mittlerer Halteabstand pro Fahrt [km]	$\overline{l_H}$	1,06	1,69	3,89
Median der kürzesten Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,k}}$	1	27	88
Median der Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,g}}$	1	26	113
Reisezeitgewinn (absolut) [Min.]	$\Delta T_{R,abs}$	1	2	4
Reisezeitgewinn (relativ, pro Abschnitt) [%]	$\Delta T_{R,rel}$	11	24	41
Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt [Min.]	t_{aH}	1	1	1
Reisegeschwindigkeit pro Fahrt [km/h]	v_R	37,55	42,86	59,15
Umsteigezwänge	N_U	0	1	2
Quotient der Zugstärkenänderung	η_{ZG}	1	2	2
Quotient Platzangebot	η_P	1	2	3
Quotient Stationshalte	η_S	1	1	2
Quotient der Verkehrsangebotsleistung	η_V	2	2	3
Varianz des Deltas des Platzangebotes [%]	$\nu_{\Delta P}$	0	0	16
Varianz der Abfahrten [%]	ν_Z	0	0	57
Varianz des Platzangebotes [%]	ν_P	0	0	17
Verkehrsangebotsleistung pro Strecke [10^3 Platzkm]	P_V	1,80	9,23	25,92

[283] Vgl. Frederiksen u. a. (2005, S. 5). Die Autorin hat auf Basis der Daten des Dezember 2016 mit dem im genannten Paper beschriebenen Methode die Zahlen verifiziert: Derzeit steigen etwa 9% der Fahrgäste innerhalb des DSB S-tog-Netzes um. (Ergebnis von Modell-Berechnungen im Mai 2017 durch Elsebet Seest, DSB S-tog / Analyse & Ledelsesrapportering, mitgeteilt per E-Mail am 17. Mai 2017.)

Abbildung 4.4.7: Verkehrliche Vergleichsparameter DSB S-tog Kopenhagen.

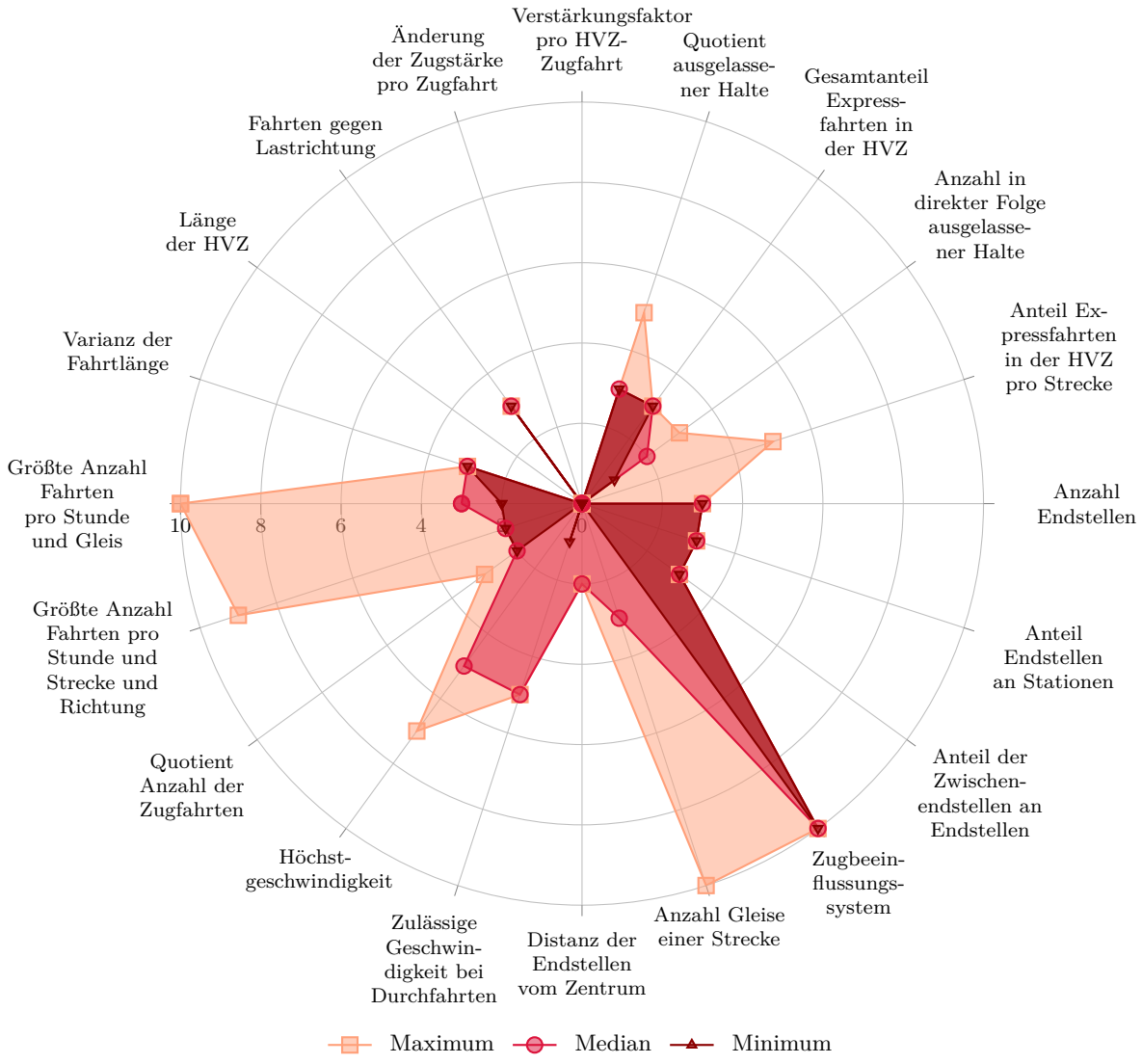

Abbildung 4.4.8: Betriebliche Vergleichsparameter DSB S-tog Kopenhagen.

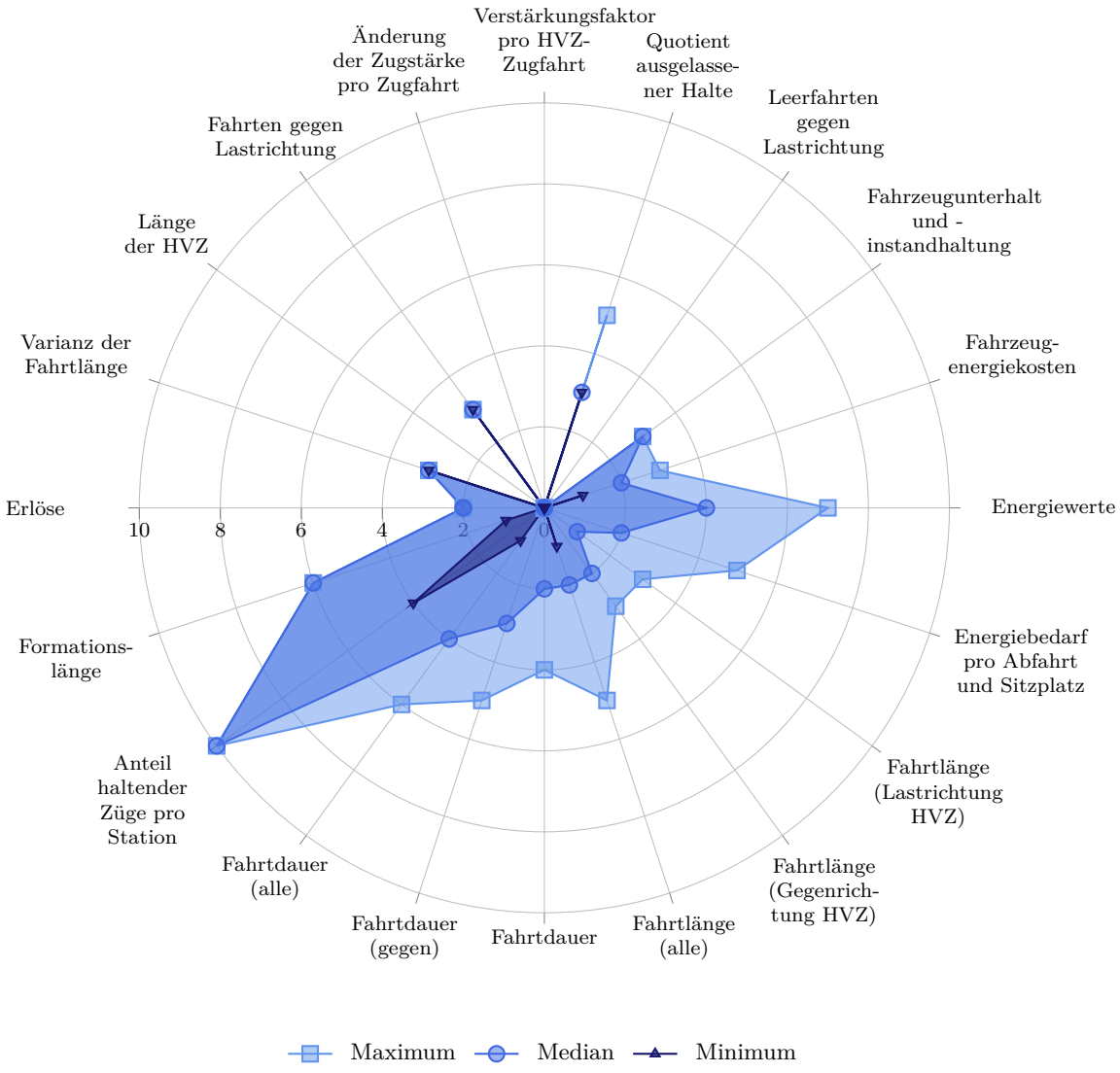

Abbildung 4.4.9: Wirtschaftliche Vergleichsparameter DSB S-tog Kopenhagen.

Tabelle 4.4.4: Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für DSB S-tog in Kopenhagen.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde und Gleis [pro h und Gleis]	$N_{ZZ,G,max}$	6	9	30
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde, Strecke und Richtung [pro h und Richtung]	$N_{ZZ,S,max}$	6	9	30
Quotient Anzahl der Zugfahrten	η_F	1	1	2
Anzahl Gleise einer Strecke	N_G	1	2	4
Distanz der Endstellen vom Zentrum [km]	l_N	11,80	35,00	43,30
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	v_{max}	40	100	120
Zugbeeinflussungssystem	ZUB		110.000	
Zulässige Geschwindigkeit bei planmäßigen Durchfahrten [km/h]	$v_{max,D}$	60	120	120
Änderung der Zugstärke pro Zugfahrt	N_{ZH}	0	0	0
Anteil der Zwischenendstellen an Endstellen [%]	η_{ZE}		50,00	
Anteil Endstellen an Stationen [%]	η_E		13,64	
Anteil Expressfahrten in der HVZ pro Strecke [%]	$\eta_{Ex,S}$	0,00	0,00	50,00
Anzahl Endstellen	N_E		12	
Anzahl in direkter Folge ausgelassener Halte	N_D	1	2	3
Quotient Zugfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,G}$	1	1	1
Gesamtanteil Expressfahrten in der HVZ [%]	η_{Ex}		29,17	
Länge der HVZ [h]	t_{HVZ}		2	
Quotient ausgelassener Halte	η_D	0,21	0,26	0,36
Varianz der Fahrtlänge [%]	ν_N		49,28	
Verstärkungsfaktor pro HVZ-Zugfahrt	l_{ZH}	1	1	1

Tabelle 4.4.5: Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien für DSB S-tog in Kopenhagen.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrterlöse [EUR/Zugkm]	E	47,50	97,38	114,00
Formationslänge [m]	l_{Zug}	85	168	168
Anteil haltender Züge pro Station [%]	η_{DH}	0,50	1,00	1,00
Energiebedarf pro Abfahrt und Sitzplatz [kJ/Platz]	$E_{B,S}$	2,02	10,24	19,43
Energiebedarf pro Abfahrt und Zuglängenmeter [kJ/m]	$E_{B,Z}$	7,24	36,65	65,35
Fahrtdauer (Last- und Gegenrichtung HVZ) [Min.]	t_{Fahrt}	17	54	79
Fahrtdauer (Gegenrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,G}$	3	30	53
Fahrtlänge (Last- und Gegenrichtung HVZ) [km]	l_{Fahrt}	12	39	76
Fahrtlänge (Gegenrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,G}$	2	21	43
Fahrtlänge (Lastrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,L}$	2	21	43
Fahrtdauer (Lastrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,L}$	3	30	53
Fahrzeugunterhalt und -instandhaltung [EUR/km]	K_{FZ}	0,68	1,49	1,76
Energiekosten [EUR/km]	K_E	0,82	1,36	1,54
Quotient der Leerfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,GL}$	0	0	0

4.5. S-Bahn München

Nach ersten Ideen für ein Münchener Stadtschnellbahnsystem zu Beginn des 20. Jahrhunderts und sehr weitgehenden Plänen in den 1930er Jahren dauerte es bis 1963, dass der Bau einer *„unterirdischen Verbindung vom Haupt- zum Ostbahnhof“* (Dix u. Staimer 2007, S. 12) in München beschlossen wurde. Die Entscheidung, die Olympischen Spiele 1972 in München durchzuführen, half dem Projekt über Finanzierungsschwierigkeiten hinweg, so dass am 28. Mai 1972 die S-Bahn München gleichzeitig mit der Eröffnung der Stammstrecke ihren Betrieb aufnehmen konnte. (Dix u. Staimer 2007, S. 21f., S. 42) Das heute 442 km großes Netz besteht aus Radialen, die sich im Stadtzentrum zu einer Stammstrecke mit einem Tunnel unter der Innenstadt vereinen. Während der S-Bahn im innerstädtischen Bereich eigene Gleise zur Verfügung stehen, verkehren die Züge auf einigen Außenstrecken im Mischverkehr mit dem übrigen Fern-, Regional- und Güterverkehr. Weitgehend besteht das in Abbildung 4.5.1 dargestellte Netz der S-Bahn München mittlerweile aus zweigleisigen Strecken. Auf einigen Linienendabschnitten[284] ist die Infrastruktur jedoch weiterhin eingleisig. Die sieben Hauptlinien[285] führen auf den Radialen im Median 32,3 km weit in das Münchener Umland, wobei das Maximum bei 48,9 km liegt.[286] Auf allen Strecken[287] besteht ein Grundangebot im 20-Minuten-Takt, wobei in den Vormittagsstunden auf fast allen Linien nur zwei von drei Fahrten bis zum Linienendpunkt verkehren.[288]

Der Fahrzeugpark besteht überwiegend aus Fahrzeugen der Baureihe 423. Die Angebotsausweitungen waren teilweise nur durch den (erneuten) Einsatz der Vorgängerbaureihe 420 möglich, die in den für diese Arbeit relevanten Bereichen gleiche Charakteristika aufweist. Tabelle 4.5.1 zeigt die für die Beschreibung des Münchener S-Bahn-Netzes verwendeten Formationen.

In der HVZ gibt es auf den zentrumsnahen Abschnitten eine Verdichtung zum 10-Minuten-Takt. Dieser entsteht entweder durch zusätzliche Fahrten auf einem Teilbereich einer Linie oder Verlängerung von Fahrten anderer Linien[289]. (Deutsche Bahn AG 2015, KBS 999.1-

[284] Beispielsweise nach Erding (S2) und Wolfratshausen (S7). (Dix u. Staimer 2007, S. 14)

[285] Die Linie S20 befährt nicht die Stammstrecke und hat wie die Linie S27 ein sehr dünnes Verkehrsangebot im Gegensatz zu dem restlichen S-Bahn-Netz.

[286] Das obere Quartil liegt bei 37,3 km, wodurch sich eine große Homogenität in der Ausdehnung der unterschiedlichen Äste zeigt.

[287] Ausnahmen sind der Ast der S2 nach Altomünster sowie die Linien S20 und die mittlerweile offiziell nicht mehr zum S-Bahn-Netz gehörende und mittlerweile mit anderen Fahrzeugen von einem anderen EVU betriebene S27, die bis Holzkirchen das S-Bahn-Netz als Expresslinie überlagert.

[288] Ein Beispiel ist die unten detaillierter betrachtete Linie S2, auf der am östlichen Linienende in den Stunden 9 bis 11 am Vormittag zwischen Erding und Markt Schwaben nur zwei anstelle von drei Zügen pro Richtung verkehren.

[289] Die S6 wird in der HVZ über den München Ost verlängert bis Zorneding und zum Teil sogar bis Grafing auf der S4.

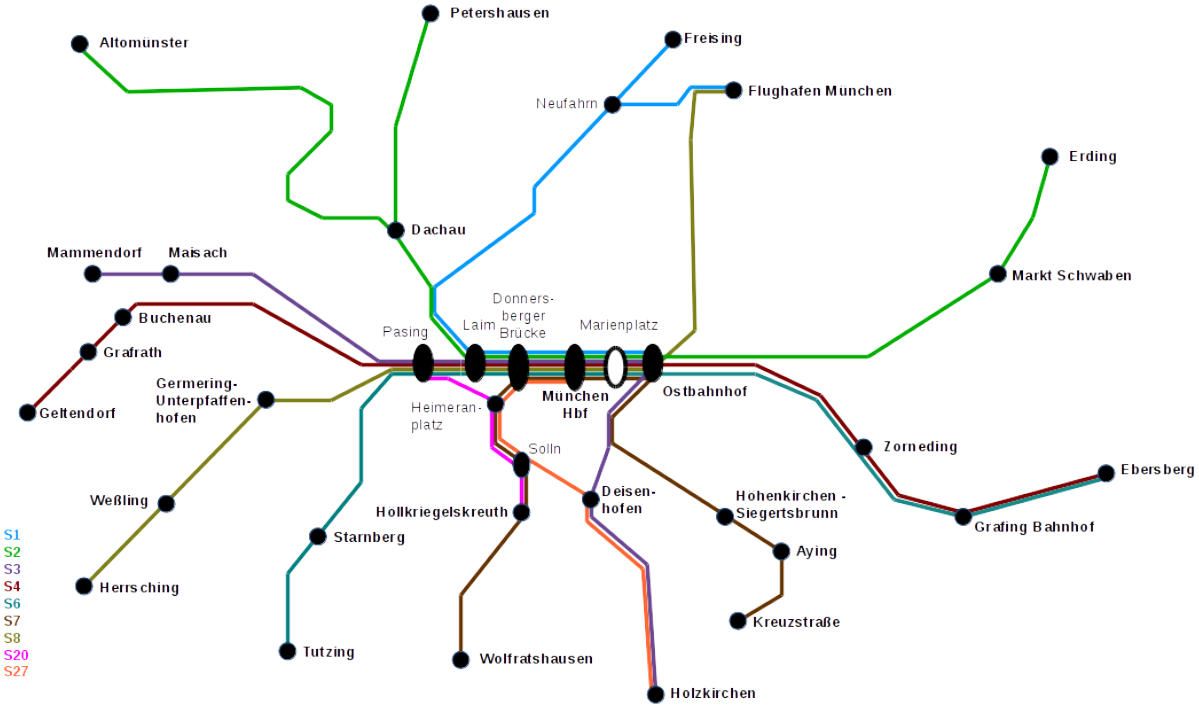

Abbildung 4.5.1: Liniennetzplan der S-Bahn München.

Tabelle 4.5.1: Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in München.

Bezeichnung	Sitzplätze	Traktion	Masse [t]	V_{max} [km/h]	Länge [m]	Cluster Referenz-fahrzeuge
423	192	Elektro	119	140	68	NV 200 E (3)
423 (Doppel-traktion)	384	Elektro	238	140	135	NV 200 E (3), NV 200 E (3)
423 (Drei-fachtrak-tion)	576	Elektro	357	140	203	NV 200 E (3), NV 200 E (3), NV 200 E (3)

30) Auf der mit Linienzugbeeinflussung (LZB) ausgestatteten Stammstrecke[290] ergeben sich in Summe 30 Fahrten pro Stunde und Richtung. Auf den Außenstrecken gibt es in der Regel Zwischenendstellen, bis zu denen der 10-Minuten-Takt in der HVZ geführt wird. Die Strecke der S8 zum Flughafen weist keine Zwischenendstelle auf, das andere Ende derselben Linie nach Herrsching bildet mit zwei Zwischenendstellen das Maximum im Netz. Mehr als die Hälfte aller Endbahnhöfe des Münchener S-Bahn-Netzes sind Zwischenendstellen.[291]

Auf der Stammstrecke gibt es drei Stationen mit Bahnsteigen auf beiden Seiten der beiden Gleise, so dass der Fahrgastwechsel beschleunigt stattfinden kann, da sich aus- und einsteigende Fahrgäste nicht behindern. An den übrigen Stationen der Stammstrecke gibt es abgesehen vom Ostbahnhof nur zwei Gleise mit jeweils einer Bahnsteigkante.

Seit dem Jahresfahrplan 2008 gibt es im Münchener S-Bahn-Netz eine erste auch als solche bezeichnete Expresslinie. Während auf anderen Radiallinien in den vergangenen Jahren das Verkehrsangebot in der HVZ Schritt für Schritt durch Einführung eines 10-Minuten-Taktes verdoppelt werden konnte,[292] ermöglichte die vorhandene zweigleisige Infrastruktur[293] im Bereich der zuvor im 20-Minuten-Takt verkehrenden östlichen S2 zwischen Markt Schwaben[294] und München Ostbahnhof, den sich die S2 mit dem übrigen Regionalverkehr der SüdostBayern-Bahn sowie dem SGV von und zum an der Strecke gelegenen Rangierbahnhof München-Riem teilt, keine derartige Taktverdichtung.[295] Ein Ausbau der Infrastruktur dieses 34,7 km langen Astes ist kurzfristig nicht absehbar. 32.000 Fahrgäste pro Tag im zentrumsnahen Abschnitt der Linie und eine erwartete weitere Fahrgastzunahme in der näheren Zukunft erforderten jedoch eine Angebotsverdichtung sowie eine sinnvolle Fahrgastverteilung.[296] Zur Angebotsverdichtung wurde ein Konzept mit abschnittsweisen Expresszügen entwickelt, das weitgehend ohne Infrastrukturausbauten auskommt.[297] Dieses sieht in der morgendlichen HVZ Expresszü-

[290] Vgl. Hornemann (2006). Im Rest des Netzes wird mit klassischer PZB90 gefahren.

[291] Es sind 15 von 28 Endbahnhöfen bzw. 54 Prozent.

[292] Vgl. Klingberg (2004).

[293] Im westlichen Bereich gibt es seit 2003 zwischen München Ost und westlich des Bahnhofs München-Riem zwei zweigleisige Strecken für die Regionalverkehrszüge einerseits und die S-Bahn-Züge andererseits. (Vieregg u. Rössler 2007, S. 8)

[294] In Markt Schwaben zweigt die S-Bahn von der ab dort eingleisigen Hauptstrecke in Richtung Mühldorf(Oberbayern) ab und führt eingleisig bis zum Endbahnhof in Erding. (o.A. 2000, S. 105, S. 135)

[295] Bis Ende 2007 bestand die Taktverdichtung nur auf dem Westast der Linie ab dem Ostbahnhof.

[296] Vgl. u. a. o.A. (2007c, 2011b); Schumacher (2007).

[297] Infrastrukturseitig waren zur Umsetzung dieses Konzeptes nur kleinere Anpassungen wie insbesondere ein zusätzliches Blocksignal zwischen Poing und Feldkirchen notwendig (Schumacher 2007), die jedoch relativ kurzfristig und mit geringerem Mitteleinsatz umgesetzt werden konnten, als dies ein kompletter Ausbau der Strecke erfordert hätte. Die durchgeführte Blockverdichtung wird mit 2,5 Millionen Euro beziffert. (Kronawitter 2007) Nach einer Erprobung des Konzeptes im September 2007 wurde dieses zum Jahresfahrplan 2008 eingeführt. (o.A. 2007d) Wenngleich der Probebetrieb nur eine akzeptable Betriebsqualität lieferte und es anfangs vor allem Defizite in der Fahrgastinformation gab (vgl. Auswertung in Blome (2007, S. 36)), sind kritische Äußerungen seit der Betriebsaufnahme nicht in nennenswertem Umfang zu verzeichnen gewesen. Nach mehreren Jahren im Regelbetrieb kann dieses Konzept daher als erfolgreich eingeführt betrachtet werden.

ge im 20-Minuten-Takt vor, die vom Anfangsbahnhof Erding bis Markt Schwaben[298] im Takt verkehren und alle Unterwegsbahnhöfe bedienen. Ab Markt Schwaben halten diese Züge nur in München-Riem und München Leuchtenbergring, bevor sie sich ab München Ostbahnhof in den Takt der übrigen Züge der Linie einfügen. Ab Markt Schwaben verkehren zusätzliche Züge, die alle Unterwegsbahnhöfe bedienen und direkten Anschluss aus Richtung Erding haben.[299] Die Expresszüge gewinnen durch das Auslassen der Halte fünf Minuten Fahrzeit bis zum Ostbahnhof, wo sie sich in das gleichmäßige Taktgefüge der Linie in Richtung Dachau einfügen.

Es handelt sich gemäß der Klassifizierung von Vuchic (1981, S. 65) um *zonal service*. Durch die nur in Lastrichtung verkehrenden Expresszüge wird eine Fahrgastlenkung erreicht, da Fahrgäste aus den Gemeinden zwischen Markt Schwaben und München[300] zwingend die in Markt Schwaben einsetzenden Züge benutzen müssen, die von dort bis zur Münchener Innenstadt die Grundbedienung aller Stationen sicherstellen, auf denen die Expresszüge durchfahren. Die Expresszüge bedienen als einzige Zwischenhalte die Stationen München-Riem und München Leuchtenbergring. Während die Station Leuchtenbergring bereits hinter dem Zusammenlaufen mehrerer Streckenäste liegt und zur Innenstadt zu zählen ist, ist der Halt in München-Riem mit der großen Einwohnerzahl im Umfeld dieser Station zu begründen.[301] Lediglich auf Relationen von Erding zu Stationen zwischen Markt Schwaben und Ostbahnhof ergibt sich durch den zusätzlich notwendigen Umstieg eine leichte Komfortminderung, wobei diese Verkehrsströme gegenüber den starken Strömen in das Münchener Zentrum nur von sekundärer Bedeutung sein dürften. Das aufgrund des Messe- und Gewerbestandorts vor dem Beginn des Münchener Stadtzentrums einzig bedeutende Fahrtziel ist die Station München-Riem, die von den Expresszügen bedient wird.

Die ermittelten Quotienten liefern für den östlichen Ast der S2 das in Abbildung 4.5.3 dargestellte Bild. Dabei sticht deutlich der mittlere Bereich zwischen Markt Schwaben und München-Riem heraus, in dem es zwar auf der Strecke ein größeres Angebot gibt - ausgedrückt im Platz-

[298] Der Bahnhof liegt etwa auf halber Strecke zwischen Erding und dem Münchener Stadtzentrum. Vgl. Abbildung 4.5.2.

[299] Vgl. Deutsche Bahn AG (2015, KBS 999.2) und Blome (2007, S. 35ff.) sowie Bildfahrplanausschnitt in Abbildung 4.5.2 auf der nächsten Seite. In oranger Farbe sind im Bildfahrplan die S-Bahn-Züge ab Markt Schwaben dargestellt, die alle Zwischenhalte bedienen, in brauner Farbe die Züge ab Erding, die ab Markt Schwaben nur in München-Riem halten. In schwarz sind die Züge des Regionalverkehrs von Mühldorf ergänzt, die ab Markt Schwaben die Strecke mit den Zügen der S2 teilen und im Korridor mit Ausnahme von Markt Schwaben an keiner Station halten. Die Regionalexpress-Züge halten auch dort nicht.

[300] Eine Ausnahme ist Riem.

[301] Laut Rappert u. a. (2016, S. 113f.) wächst der Stadtbezirk Trudering-Riem sehr stark. Mit bereits etwa 15.000 Einwohnern ist allein die in der Nähe der S-Bahnstation liegende Messestadt Riem als Teil des gesamten Bezirks bezogen auf die Einwohnerzahl größer als die Gemeinde Markt Schwaben (o.A. 2011d, S. 6), die jedoch eine deutlich größere Fläche abdeckt. Die Station Berg am Laim wird durch weitere Züge der Linien S4 und S6 aus Richtung Zorneding/Ebersberg bedient. Alle weiteren (ausgelassenen) Zwischenhalte haben bedeutend weniger Einwohner und somit entsprechend geringes Verkehrspotenzial.

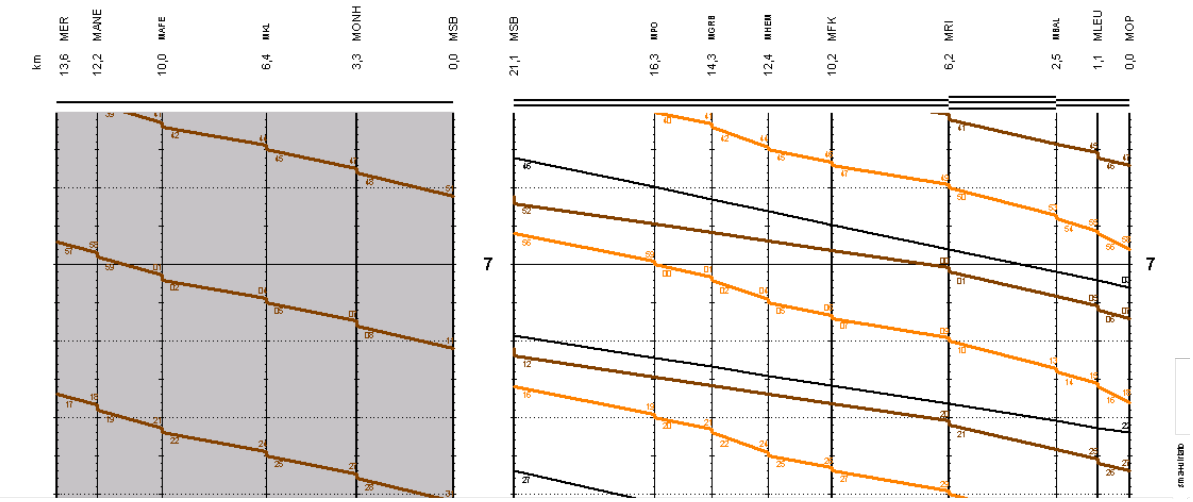

Abbildung 4.5.2: Bildfahrplanausschnitt des Korridors Erding (MER) - Markt Schwaben (MSB) - München Ostbahnhof (MOP) für stadteinwärts fahrende Züge zwischen 06:40 und 07:10 Uhr [eigene Darstellung mit Viriato nach Deutsche Bahn AG (2011, KBS 940, 999.2)].

angebot sowie der Verkehrsangebotsleistung -, dies jedoch den Fahrgästen an den Stationen von Poing bis Feldkirchen nicht zugänglich ist. Dort ist das Angebot in der HVZ unverändert.

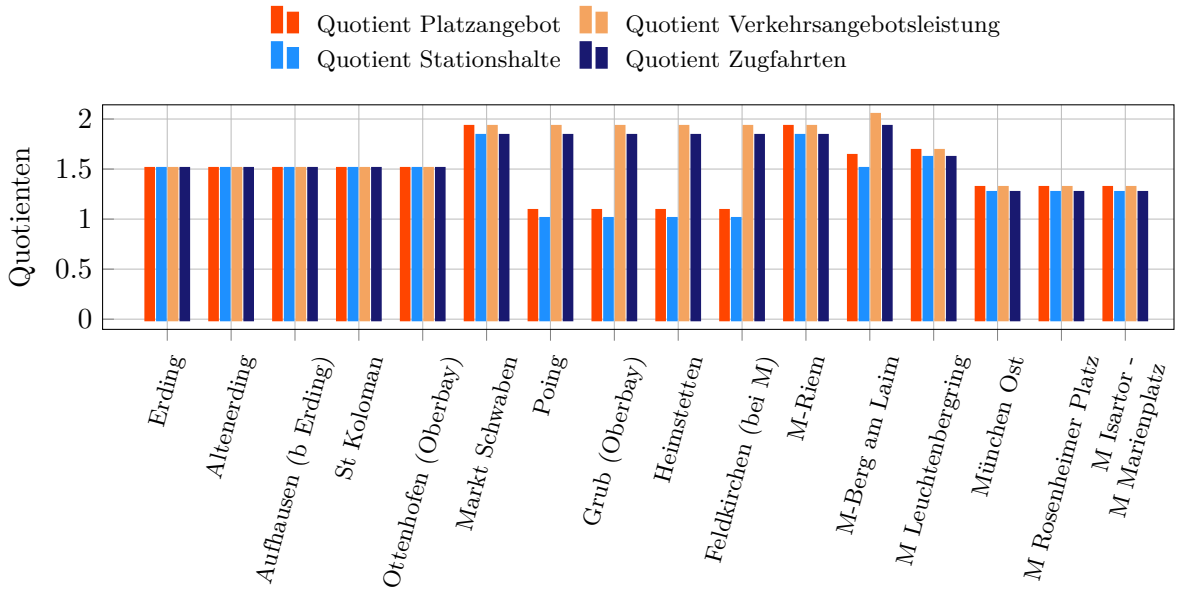

Abbildung 4.5.3: Quotienten für den östlichen Ast der S2 der S-Bahn München.

Weitere Expressfahrten findet man in München auf den Linien S4 und S7. Auf der westlichen S4 gibt es in Lastrichtung Verstärkerfahrten, die am Münchener Hbf enden und ab München-Pasing alle Zwischenhalte auslassen. (Deutsche Bahn AG 2015, KBS 999.4) Diese Züge

verlassen jedoch in München-Pasing die S-Bahn-Gleise und verkehren über die parallel verlaufenden Regional- und Fernbahngleise, so dass der Fahrzeitgewinn nicht direkt vergleichbar ist. Auf der S7 lässt während des 20-Minuten-Taktes bis Kreuzstraße eine Fahrt pro Stunde und Richtung die Station Peiß aus, so dass hier in der HVZ nur zwei Züge pro Stunde und Richtung halten. Zwischen Holzkirchen und Deisenhofen fahren die Züge der S27 an zwei Stationen durch und erreichen eine um vier Minuten kürzere Reisezeit als die dort haltenden Züge.(Deutsche Bahn AG 2015, KBS 999.27) Die Züge der nur in der HVZ verkehrenden Linie S20 lassen die Station München Harras aus, da sie über eine parallele Strecke verkehren, die keinen Bahnsteig an dieser Station hat.(Deutsche Bahn AG 2015, KBS 999.7) Tabelle 4.5.2 zeigt, dass lediglich die Züge der S2 von Mark Schwaben in die Münchener Innenstadt *echte* Expresszüge sind, da der Anteil der durchfahrenen Stationen bei einem Drittel liegt. Auf den anderen Linien ist der Anteil eher gering, so dass das Auslassen nicht ausschließlich verkehrliche Gründe haben dürfte.

Die Verstärker auf den Linien S4, S6 und S8 sowie die Verstärkerlinie S20 verkehren nicht auf der gesamten Linienlänge oder im gleichen Takt wie die übrigen Züge, so dass sich auf diesen Abschnitten eine ungleiche Verteilung der Zugfahrten ergibt. Im übrigen Netz erfolgt eine gleichmäßige Verdichtung, was sich im Median der Varianz der Abfahrtsabstände zeigt. Einen gleichartigen Rhythmus gibt es im gesamten Netz während der HVZ.

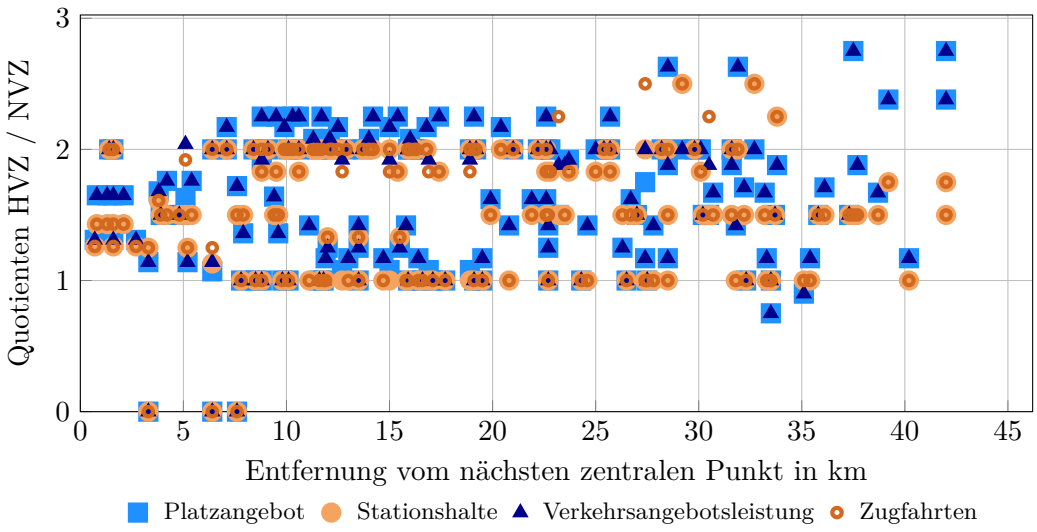

Abbildung 4.5.4: Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei der S-Bahn München.

Abbildung 4.5.4 zeigt die bestimmten Quotienten für das gesamte Münchener S-Bahn-Netz. Auffällig ist, dass an sehr vielen Stationen die Anzahl der Zugfahrten erhöht wird. In noch

stärkerem Maß steigt überwiegend die Verkehrsangebotsleistung. Hier zeigt sich der Einsatz längerer Züge. Die isolierte Betrachtung der Werte der östlichen S2 zeigt, dass das zusätzliche Angebot nur für Reisende von und zu den vier Zwischenhalten der Expresszüge Relevanz hat. An den übrigen Stationen in diesem Bereich bleibt das Verkehrsangebot im Vergleich zum restlichen Tagesverlauf konstant.[302] Auch die Fahrgäste der ausgelassenen Halte profitieren von den Expresszügen, da sie bei unverändertem Angebot an *ihrer* Station mehr freie Plätze zur Verfügung haben, da ein Großteil der Fahrgäste aus Erding und Markt Schwaben die Expresszüge nutzt.[303]

Durch das Auslassen von Zwischenhalten ergeben sich die in Tabelle 4.5.2 dargestellten Reisezeitverkürzungen. Pro ausgelassenem Zwischenhalt beträgt der Reisezeitgewinn $1,3$ Minuten.

Tabelle 4.5.2: Reisezeitgewinne auf den einen oder mehrere Halte auslassenden Fahrten in München.

Anzahl Fahrten	Abschnitt	t (m. Halt)	t (o. Halt)	Δ Halte	$\Delta t_{R,abs}$	η_D
1	M Siemenswerke - M Harras	4	3	1	1	0.14
3	Holzkirchen - Deisenhofen	13	9	2	4	0.2
1	Großhelfendorf - Aying	3	3	1	0	0.06
5	Markt Schwaben - M Leuchtenbergring	20	14	5	6	0.31

Fahrten entgegen der Lastrichtung sind auf den S2 und S4 Leerfahrten. Einige Verstärkerfahrten der S4 haben in der HVZ keine Pendant und verkehren somit nur in Lastrichtung. Auf den anderen Linien gibt es abgesehen von Ein- und Aussetzfahrten die Verdichtung in beide Fahrtrichtungen. Differenziert wird bei der S-Bahn München neben der Fahrtenanzahl jedoch auch stark über die Zuglänge und damit das Platzangebot.[304]

Während im Tagesverkehr abgesehen von umlaufbedingten einzelnen Fahrten auf allen Stammlinien Vollzüge[305] eingesetzt werden, verkehren in der HVZ in Lastrichtung[306] zahlreiche Fahrten mit Langzügen. Dabei werden die Fahrten teilweise nur auf einzelnen Abschnitten zu Langzügen verstärkt. Einige Fahrten werden im Fahrtverlauf zwei Mal in ihrer Länge verändert.[307]

[302] Unerheblich ist hier, welche Züge das Angebot bereit stellen. In diesem Fall übernehmen die Verstärkerzüge die Grundbedienung zwischen Markt Schwaben und München Ost, während die Stammzüge Zwischenhalte auslassen.

[303] Vgl. Erläuterungen im Abschnitt 3.2.1.2 auf Seite 22.

[304] Da von der DB Regio AG auf Nachfrage keine Daten zur Verfügung gestellt werden konnten, basieren die folgenden Aussagen auf Zugstärkenlisten, die (offensichtlich von Mitarbeitern der S-Bahn München) in einem Internetforum für das Fahrplanjahr 2010 veröffentlicht wurden: o.A. (2010b).

[305] So werden in München aus zwei Triebzügen gebildete Einheiten bezeichnet.

[306] Umlaufbedingt gibt es auch einzelne Langzüge entgegen der Lastrichtung.

[307] Ein Beispiel ist die oben beschriebene S2: Hier wird ein aus Erding kommender Vollzug in Markt Schwaben zum Langzug verstärkt, in München Ostbahnhof bzw. Dachau wird der hintere Zugteil abgekuppelt und der Zug setzt seine Fahrt als Vollzug nach Petershausen fort.

Es ergibt sich auf den meisten Abschnitten ein gleichmäßiges Platzangebotes. Die maximale Varianz liegt hier bei 49 %,[308] die maximale Varianz des Deltas des Platzangebotes, entstanden durch sich abwechselnde unterschiedliche Zuglängen liegt bei 31 %.

Zusammen mit der oben genannten teilweise ungleichen Verteilung der Zugfahrten ergibt sich streckenweise ein stark differenziertes Bild, wie es Abbildung 4.5.5 für die S7 auf dem Ast von Wolfratshausen zeigt: Dort findet man im südlichsten Abschnitt komplette Gleichförmigkeit. Hier verkehren drei Züge pro Stunde mit derselben Zugbildung. Ab Höllkriegelsreuth wird mit einigen Zügen verstärkt, jedoch nicht zum glatten 10-Minuten-Takt. Ab München-Solln gibt es eine Überlagerung mit weiteren Linien, die mit kürzeren Zügen bedient werden, so dass sich hier neben größerer Varianz der Abfahrtsabstände auch Varianzen des Platzangebotes zeigen.[309]

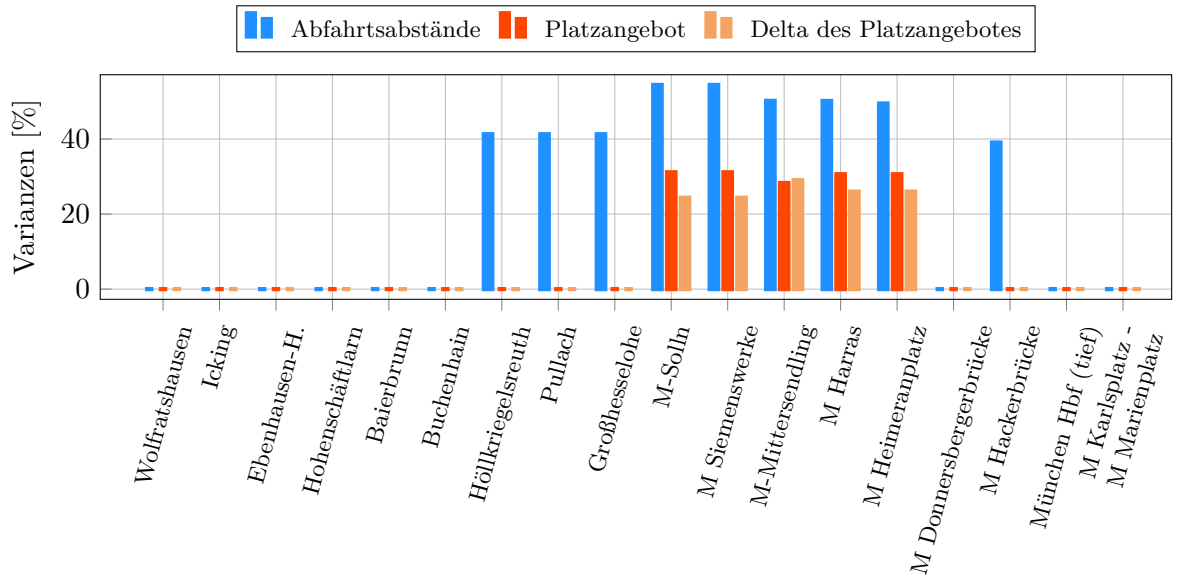

Abbildung 4.5.5: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast ab Wolfratshausen der Münchener S-Bahn in der HVZ.

Abbildungen 4.5.6 bis 4.5.8 sowie Tabellen 4.5.3 bis 4.5.5 fassen alle zusammengestellten Vergleichsparameter für die Münchener S-Bahn zusammen. Die verkehrliche Betrachtung zeigt eine starke Differenzierung. Hervorzuheben sind neben den Verdichtungen im Platzangebot sowie der Stationshalte die Maxima in den Varianzen des Deltas des Platzangebotes sowie der Abfahrtsabstände, die zumindest auf einzelnen Abschnitten deutliche Schwankungen zeigen. Betrieblich ist in München besonders die Änderung der Zugstärke während des Reiseverlaufs.

[308] Auf dem kurzen Abschnitt zwischen den Stationen Flughafen Besucherpark und Flughafen München gibt es Kurzzüge der S1 und Langzüge der S8.

[309] Weitere Abbildungen siehe Abbildungen 4ff. im Anhang.

Die betriebliche Komplexität ist einerseits durch die dichte Zugfolge auf der Stammstrecke und andererseits durch die große Zahl an Endstellen sehr hoch.

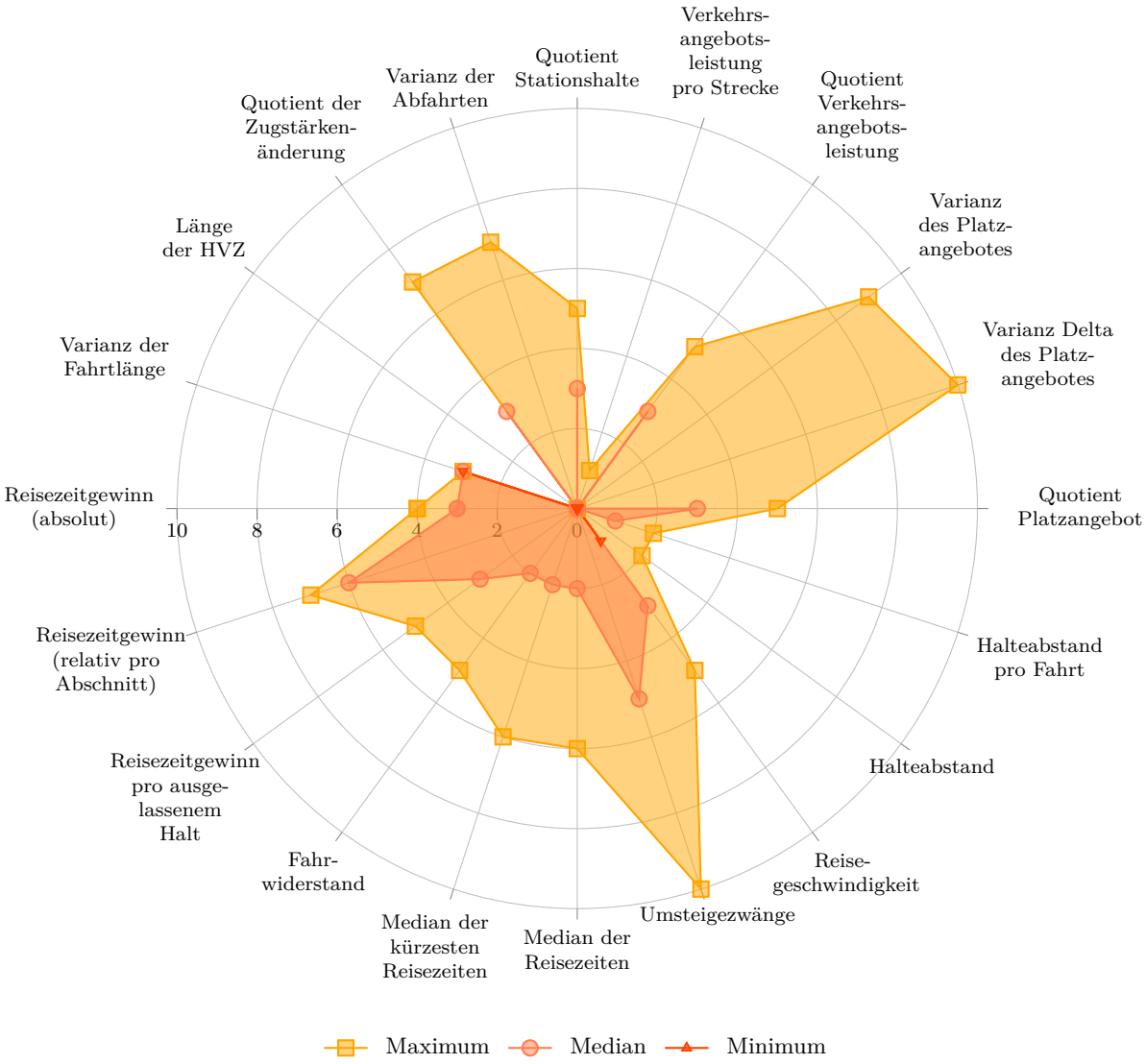

Abbildung 4.5.6: Verkehrliche Vergleichsparameter S-Bahn München.

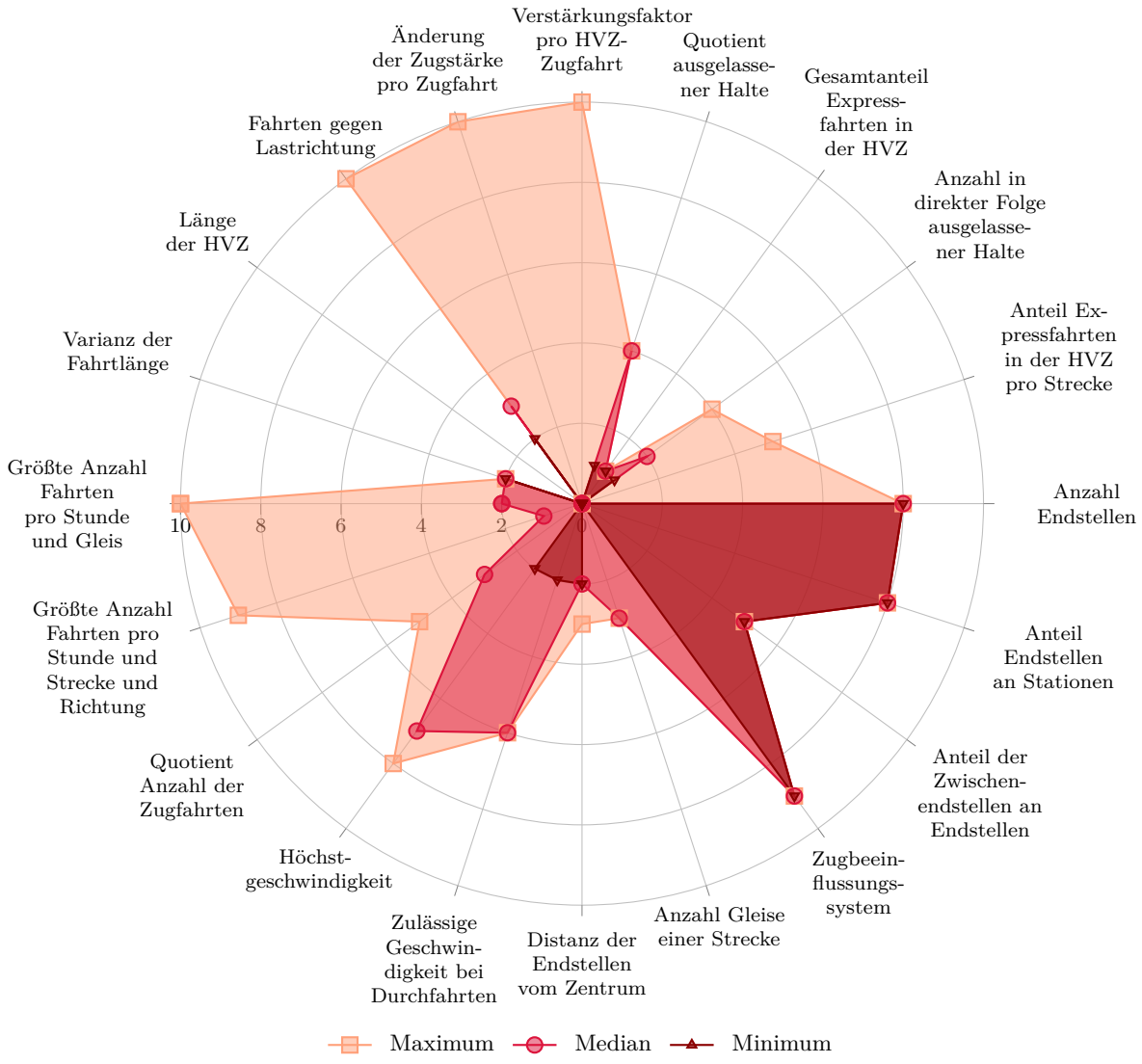

Abbildung 4.5.7: Betriebliche Vergleichsparameter S-Bahn München.

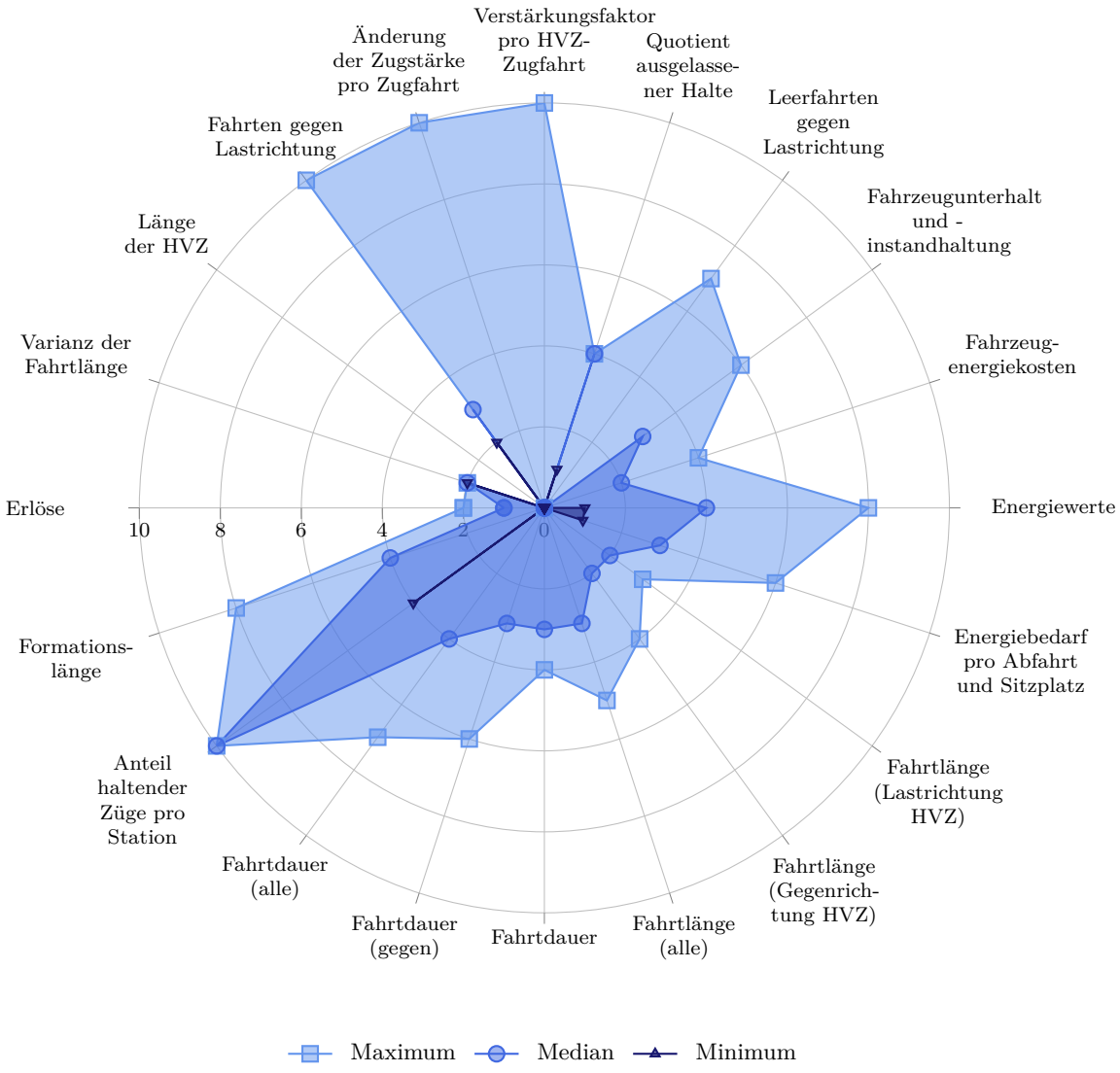

Abbildung 4.5.8: Wirtschaftliche Vergleichsparameter S-Bahn München.

Tabelle 4.5.3: Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn München.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrwiderstand [EUR/Platz-h]	L_i	0	9	25
Halteabstand [km]	l_H	0,50	1,70	17,90
Mittlerer Halteabstand pro Fahrt [km]	$\overline{l_H}$	0,90	2,23	5,20
Median der kürzesten Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,k}}$	1	47	126
Median der Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,g}}$	1	42	136
Reisezeitgewinn (absolut) [Min.]	$\Delta T_{R,abs}$	0	4	5
Reisezeitgewinn (relativ, pro Abschnitt) [%]	$\Delta T_{R,rel}$	0	31	36
Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt [Min.]	t_{aH}	0	1	2
Reisegeschwindigkeit pro Fahrt [km/h]	v_R	32,40	47,40	78,00
Umsteigezwänge	N_U	0	1	2
Quotient der Zugstärkenänderung	η_{ZG}	0	1	2
Quotient Platzangebot	η_P	0	2	3
Quotient Stationshalte	η_S	0	2	3
Quotient der Verkehrsangebotsleistung	η_V	0	2	3
Varianz des Deltas des Platzangebotes [%]	$\nu_{\Delta P}$	0	0	31
Varianz der Abfahrten [%]	ν_Z	0	0	60
Varianz des Platzangebotes [%]	ν_P	0	0	40
Verkehrsangebotsleistung pro Strecke [10^3 Platzkm]	P_V	0,61	4,49	21,47

Tabelle 4.5.4: Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien für die S-Bahn München.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde und Gleis [pro h und Gleis]	$N_{ZZ,G,max}$	2	6	30
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde, Strecke und Richtung [pro h und Richtung]	$N_{ZZ,S,max}$	1	4	30
Quotient Anzahl der Zugfahrten	η_F	0	2	3
Anzahl Gleise einer Strecke	N_G	1	2	2
Distanz der Endstellen vom Zentrum [km]	l_N	31,60	37,50	48,90
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	v_{max}	60	120	140
Zugbeeinflussungssystem	ZUB		100.100	
Zulässige Geschwindigkeit bei planmäßigen Durchfahrten [km/h]	$v_{max,D}$	80	135	140
Änderung der Zugstärke pro Zugfahrt	N_{ZH}	0	0	1
Anteil der Zwischenendstellen an Endstellen [%]	η_{ZE}		53,57	
Anteil Endstellen an Stationen [%]	η_E		18,67	
Anteil Expressfahrten in der HVZ pro Strecke [%]	$\eta_{Ex,S}$	0,00	0,00	45,45
Anzahl Endstellen	N_E		28	
Anzahl in direkter Folge ausgelassener Halte	N_D	1	2	4
Quotient Zugfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,G}$	1	1	4
Gesamtanteil Expressfahrten in der HVZ [%]	η_{Ex}		7,25	
Länge der HVZ [h]	t_{HVZ}		2	
Quotient ausgelassener Halte	η_D	0,06	0,31	0,31
Varianz der Fahrtlänge [%]	ν_N		41,26	
Verstärkungsfaktor pro HVZ-Zugfahrt	l_{ZH}	1	1	2

Tabelle 4.5.5: Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien für die S-Bahn München.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrterlöse [EUR/Zugkm]	E	36,48	72,96	109,44
Formationslänge [m]	l_{Zug}	68	135	203
Anteil haltender Züge pro Station [%]	η_{DH}	0,55	1,00	1,00
Energiebedarf pro Abfahrt und Sitzplatz [kJ/Platz]	$E_{B,S}$	4,34	12,05	23,62
Energiebedarf pro Abfahrt und Zuglängenmeter [kJ/m]	$E_{B,Z}$	12,34	34,27	67,17
Fahrtdauer (Last- und Gegenrichtung HVZ) [Min.]	t_{Fahrt}	5	59	102
Fahrtdauer (Gegenrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,G}$	5	36	63
Fahrtlänge (Last- und Gegenrichtung HVZ) [km]	l_{Fahrt}	7	48	86
Fahrtlänge (Gegenrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,G}$	3	32	49
Fahrtlänge (Lastrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,L}$	3	32	49
Fahrtdauer (Lastrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,L}$	5	39	61
Fahrzeugunterhalt und -instandhaltung [EUR/km]	K_{FZ}	0,82	1,64	2,46
Energiekosten [EUR/km]	K_E	0,64	1,28	1,92
Quotient der Leerfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,GL}$	0	0	0

4.6. Réseau Express Régional im Großraum Paris

Als Klammer zwischen der mit einem engmaschigen Netz das Pariser Stadtgebiet erschließenden Métro[310], das auf einzelnen Linien in den letzten Jahrzehnten die Stadtgrenze überschritten hat, und dem in die Fläche führenden derzeit als *Transilien* bezeichneten Regionalverkehr gibt es seit den 1970er Jahren das sogenannte *RER*[311]. In seinen verkehrlichen Aufgaben den deutschen S-Bahn-Systemen entsprechend, wurde das RER-System zur Ausweitung der Kapazitäten im Pendlerverkehr aufgrund zahlreicher neuer Wohnvorstädte sowie zur innerstädtischen Entlastung der Métro eingeführt. (Sparkuhle 1969, S. 1110);(Ebersbach 1975) Beginnend im Jahr 1969 wurde das Netz schrittweise auf- und ausgebaut. Zunächst substituierte es nur ehemalige radiale Vorortstrecken und wurde später durch neue Tunnelstrecken innerhalb von Paris erweitert. Heutzutage verbinden die RER-Züge weite Teile des Großraums Paris mit dem Stadtzentrum, wobei dort nur ausgewählte aufkommenstarke Stationen bedient werden und die Grunderschließung der Métro überlassen bleibt. Auf den mittlerweile fünf RER-Linien mit 21 Außenästen werden jährlich etwa 44 Millionen Zugkilometer erbracht und täglich etwa 3,3 Millionen Fahrgäste befördert. (o.A. 2013a; STIF 2015, 2016) Betrachtet werden nachfolgend die drei in Abbildung 4.6.1 dargestellten Linien A, B und E.[312]

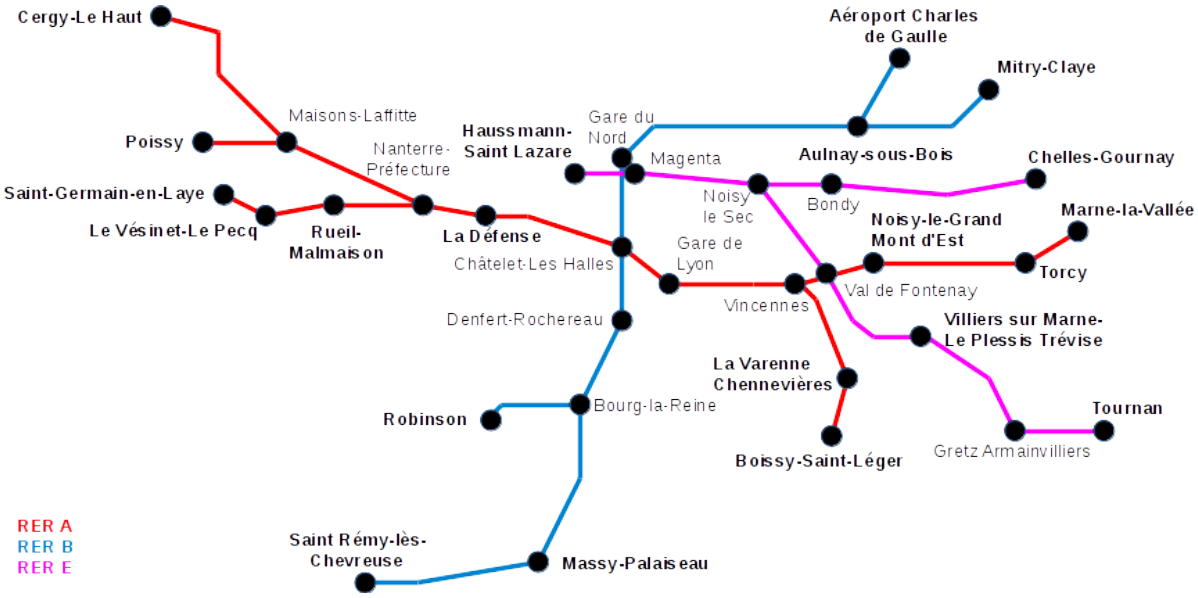

Abbildung 4.6.1: Liniennetzplan der RER-Linien A, B und E in Paris.

[310] Im Berliner Umfeld sei an in dieser Stelle angemerkt, dass sich in Paris hinter der Bezeichnung *Métro* tatsächlich ein U-Bahn-System verbirgt.

[311] Übersetzt etwa: *Regionales Schnellverkehrsnetz.*

[312] Die Linien C und D wurden weggelassen aus Gründen der zu erfassenden Datenmenge. Sie sind in ihrer Betriebsdurchführung vergleichbar mit den Linien A, B und E.

Mit Ausnahme der Linie E[313] haben alle RER-Linien sämtliche Linienendpunkte - alle Linien verzweigen sich auf den Außenstrecken in mehrere Äste - außerhalb des Pariser Stadtgebietes und verbinden so die Außenäste über die zentralen Stammstrecken in der Innenstadt. Mit dem Bau dieser Stammstrecken verfolgte man das Ziel, die aus den Vororten kommenden Reisenden besser innerhalb von Paris zu verteilen, da sie so nicht mehr nur *„einen Ankunftsbahnhof in der Hauptstadt“* (Gerondeau 2003, S. 26) hätten, wo aufwändige Umstiege zum innerstädtischen Verkehr notwendig waren. Dennoch kann der Großraum Ile-de-France mit Paris in seinem Zentrum als monozentrisch bezeichnet werden, da die Verkehre aus den umliegenden Vororten sehr stark auf Paris ausgerichtet sind.[314] In den durchgebundenen Zügen einer Linie findet auf ihrem Weg durch das Pariser Stadtgebiet ein nahezu vollständiger Austausch der Fahrgäste statt. STIF (2013, S. 15) beziffert den Anteil der Fahrgäste der Linie B,[315] die das Stadtgebiet in den Zügen dieser Linie durchqueren und nicht an einem der innerstädtischen Bahnhöfe aus- oder umsteigen, auf drei Prozent.

Zu unterschiedlichen Tageszeiten bestehen auf den Linien teilweise grundlegend unterschiedliche Verkehrsangebote.[316] Einen ganztägig durchgehenden Grundtakt gibt es in der Regel nicht. Jedoch hat jede Verkehrszeit einen (eigenen) festen Rhythmus,[317] in dem sich die einzelnen Bedienungsschemata wiederholen. Die Mindestbedienung der Stationen differiert in Abhängigkeit der Aufkommensbedeutung und Lage an der Linie sehr stark. (STIF 2013, S. 14) In den HVZ gibt es auf den Strecken eine dichte Zugfolge von bis zu zwei Minuten auf den Stammstrecken im Innenstadtbereich. Auf den Außenstrecken ergeben sich bei gleicher Zuganzahl auf der Strecke geringere Haltezahlen an den einzelnen Stationen, da die Züge dort die meisten Stationen nur alternierend bedienen.[318] Ein Beispiel ist der Ast vom Flughafen Charles-de-Gaulle in die Innenstadt, der in Abbildung 4.6.2 dargestellt ist. Hier sieht man einerseits das in der HVZ veränderte Halteschema der Expresszüge, die die drei Stationen Parc des Expositions, Villepinte und Sevran-Beaudottes bedienen und dort das nutzbare Angebot verdoppeln.[319] An den Stationen Blanc-Mesnil, Drancy und Le Bourget ist es andersherum: Hier bleibt die Zahl

[313] Ihren derzeitigen Endbahnhof Haussmann-Saint Lazare kann man als temporär bezeichnen, da ein Weiterbau Richtung Westen in Planung ist. (o.A. 2014e).

[314] Das Zentrum erstreckt sich bezogen auf die drei aus den als Banlieue bezeichneten Vororten kommenden Linien mehr oder weniger über das gesamte Pariser Stadtgebiet.

[315] Die Betrachtung erfolgte für den im Frühjahr 2013 vor der Umsetzung des Projektes *RER B Nord +* zum 2. September 2013 geltenden Fahrplan, durch den das Betriebskonzept auf dem nördlichen Abschnitt der Linie B grundlegend und unter teilweiser Abkehr der differenzierten Bedienung verändert wurde. Siehe u. a. o.A. (2003b, 2012c); STIF (2013).

[316] Die Aspekte lassen sich auch bei den *Transilien*-Linien des Regionalverkehr wiederfinden.

[317] Zum Begriff des *Rhythmus* siehe auch Walf (2008, S. 10).

[318] Im Fall von Betriebsstörungen mit Zugausfällen halten die noch verkehrenden Züge zusätzlich an den sonst nur von den ausfallenden Fahrten bedienten Stationen. Man kehrt somit von der alternierenden Bedienung ab. Dies dient der Sicherstellung der Mindestbedienung aller Stationen und erleichtert den Fahrgästen im Störungsfall das Finden der richtigen Verbindung zum Fahrtziel.

[319] In der NVZ fahren diese Züge ohne Halt ab der Station Aéroport-Charles-de-Gaulle 1 bis Gare du Nord.

der Stationshalte und auch das den dort einsteigenden Fahrgästen zur Verfügung stehende Platzangebot zwischen HVZ und NVZ gleich, obwohl auf der Strecke die Zahl der Zugfahrten erhöht wird.

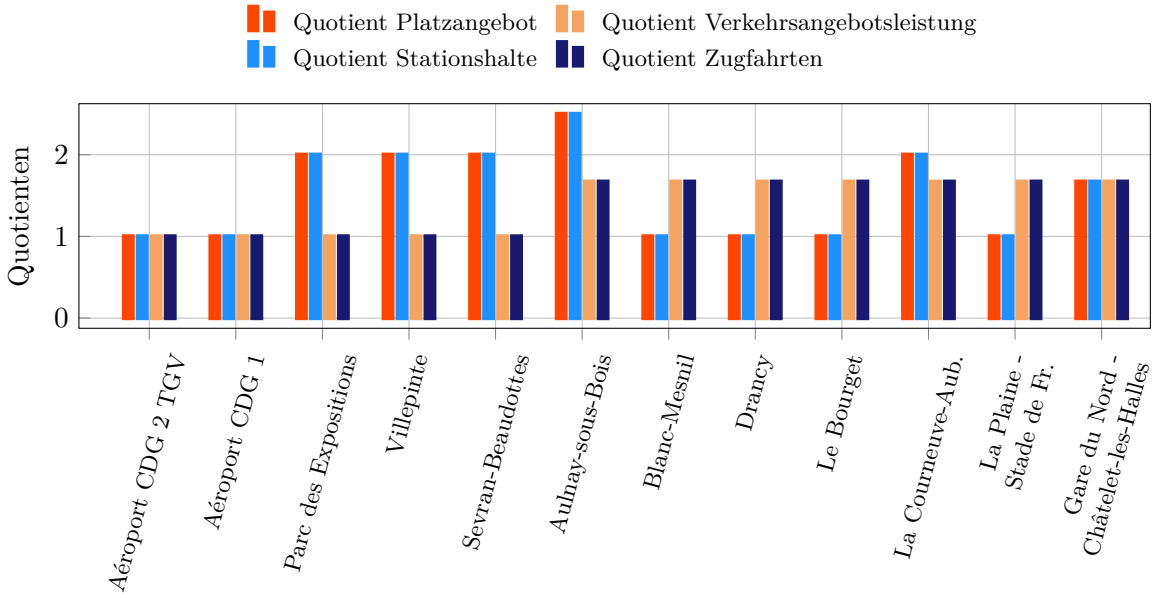

Abbildung 4.6.2: Quotienten auf dem Ast Aéroport Charles de Gaulle 2 TGV - Châtelet-les-Halles in der HVZ.

Die dichte technische Zugfolge auf der Stammstrecke der RER-Linie A von weniger als 120 Sekunden[320] ist nur möglich durch das dort eingesetzte kontinuierlich wirkende System SACEM.[321] Auf den Außenästen der Linie A sowie den anderen Linien kommt ein punktuelles Zugbeeinflussungssystem (KVB/KCVB) zum Einsatz. (STIF 2012, S. 14)

Abgesehen von wenigen Ausnahmen auf der RER-Linie E sowie in der HVZ auf der nördlichen RER-Linie B[315] finden keine Überholungen zwischen Zügen der gleichen Linie statt. Der Betrieb entspricht vielmehr dem Prinzip des *„gestaffelten Fahrplans“* (Juhnke 1966a, S. 94, S. 168f.), in dem ein Zug mit geringerer Reisegeschwindigkeit aufgrund von häufigeren Zwischenhalten an einem Zwischenendbahnhof endet, an dem kurze Zeit darauf[322] der schnellere Zug eintrifft. Anders ausgedrückt: An der Stelle, an der eine Überholung aufgrund unterschied-

[320] Diese Zugfolge wird auch praktisch ausgenutzt mit 30 Fahrten pro Richtung in Lastrichtung. (STIF 2012, S. 17)

[321] *Système d'Aide à la Conduite, à l'Exploitation et à la Maintenance* - frei übersetzt: *System zur Unterstützung des Fahrers, der Betriebsdurchführung und der Wartung.*

[322] Oftmals folgt der weiterfahrende Zug im Blockabstand. Als Beispiel sei hier Massy-Palaiseau auf der Linie B genannt. Dem zuvor überall haltenden und dort endenden Zug folgt im Blockabschnitt ein Zug, der an den vorhergehenden Stationen überwiegend durchfährt und ab Massy-Palaiseau die Grundbedienung übernimmt. Dieser Anschlusszug hält auf dem Nachbargleis am selben Bahnsteig.

licher Reisegeschwindigkeiten stattfinden müsste, endet der langsamere Zug. Vuchic (1981, S. 65) bezeichnet dieses Betriebsschema als *zonal service*.

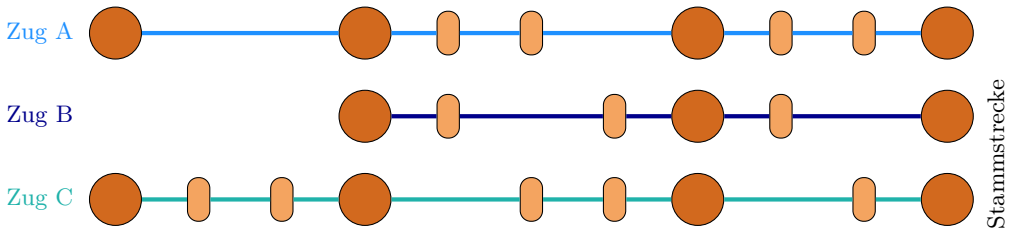

Abbildung 4.6.3: Skip-Stop-Bedienung auf dem Ast der RER-Linie A von Marne-la-Vallée in der morgendlichen HVZ.

Neben diesem abschnittsweisen Auslassen von Haltestellen kommt auf den RER-Linien auch die bei Vuchic (1986, S. 318) beschriebene *skip-stop operation* zur Anwendung, bei der von aufeinander folgenden Zügen abwechselnd Haltestellen ausgelassen werden. Beispiele sind der in Abbildung 4.6.3 dargestellte östliche Ast der Linie A nach Marne-la-Vallée sowie die westlichen Ästen nach Poissy bzw. Cergy-le-Haut und Saint-Germain-en-Laye. Mit dem Ziel der gleichmäßigen Auslastung der Züge am Beginn der an der Kapazitätsgrenze liegenden Stammstrecke lassen die Züge im Zulauf alternierend einzelne Zwischenhalte aus. Eine *willkürliche* Verteilung der Reisenden auf alle Züge verhindert, indem nicht alle Züge an allen Zwischenstationen halten. Abbildung 4.6.4 zeigt die Anzahl an Stationshalten auf dem östlichen Ast der RER-Linie A in der morgendlichen HVZ in Lastrichtung. Auf der Gesamtstrecke verkehren von Marne-la-Vallée in Richtung der Innenstadt zwei Züge pro 10-Minuten-Intervall. Ein dritter Zug pro Intervall beginnt in Torcy. Lediglich an den Stationen, die entweder Umsteigemöglichkeiten zu anderen Schienenverkehrsmitteln[323] bieten, Zwischenendstelle sind[324] oder eine besonders hohe Nachfrage[325] haben, halten alle Züge. Die Gegenüberstellung von Einsteigern und der Anzahl an Halten in Lastrichtung in Abbildung 4.6.4 zeigt, dass die vergleichsweise schwach frequentierten Stationen Val d'Europe, Bussy-Saint Georges, Lognes und Noisiel nicht von allen Zügen bedient werden. Die dort einsteigenden Fahrgäste haben mit bis zu zwei Fahrten innerhalb von zehn Minuten ein gutes Angebot, können jedoch nicht in die dort schon sehr gut gefüllten durchfahrenden Züge einzusteigen.[326] In STIF (2012, S. 115) schreiben die Verfasser, dass das derzeitige Bedienschema *„den Anforderungen der einzelnen Halte entspricht"* -

[323] Diese Umsteigestationen sind fett hervorgehoben. Die Station Val-de-Fontenay ist mit durchschnittlich gut 31.000 Reisenden pro Tag an Position sieben der am stärksten nachgefragten Stationen dieser Linie. (STIF 2012, S. 23)

[324] Dies trifft auf den Bahnhof Torcy zu, der kursiv beschriftet ist.

[325] Der Bahnhof Noisy-le-Grand ist mit durchschnittlich 19.000 Reisenden pro Tag unter den acht am stärksten nachgefragten Stationen dieser Linie zu finden. (STIF 2012, S. 23) Der Halt weiterer Züge an der Station Neuilly-Plaisance ist aufgrund der technischen Zugfolgezeit nicht möglich. (STIF 2012, S. 71)

[326] Dass es Relationen gibt, in denen zwingend umzusteigen ist, wird in Kauf genommen. So wird eine relativ ausgeglichene Besetzung der Züge bei der Einfahrt in die Stammstrecke erreicht, die sich bei Halt an allen Stationen nicht einstellen würde. (STIF 2012, S. 116, 118) In derselben Studie wurde die Umwandlung in

in anderen Worten: schwächer frequentierte Stationen werden entsprechend von weniger Zügen bedient.

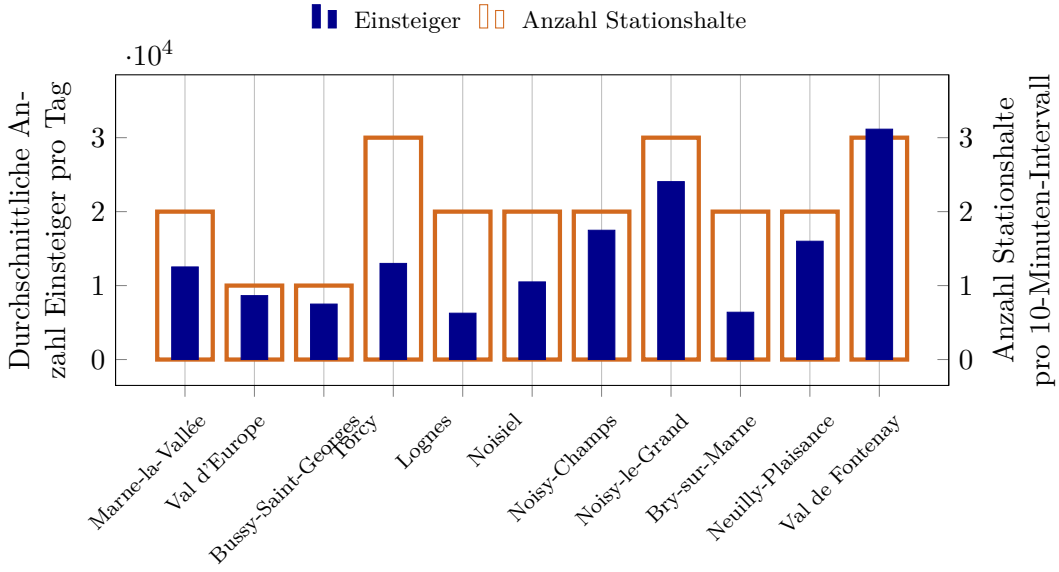

Abbildung 4.6.4: Durchschnittliche Anzahl Einsteiger pro Tag sowie Halte pro zehn Minuten in Lastrichtung an den Stationen des Astes Marne-la-Vallée der Pariser RER-Linie A [eigene Darstellung, mit Daten aus STIF (2012, S. 23f.,55), o.A. (2007b, S. 8) und o.A. (2012d, S. 4)].

Der Fahrzeugpark ist auf den Linien B und E jeweils homogen.[327] Auf der Linie A werden alle drei unterschiedlichen Baureihen aus Tabelle 4.6.1 eingesetzt. Die Folgen der unterschiedlichen Platzangebote der eingesetzten Formationen sind in Abbildung 4.6.5 ersichtlich, wo beispielhaft der Streckenast von St-Germain-en-Laye dargestellt ist. Hier ergibt sich durch die wechselnden Formationen Varianzen im Platzangebot.[328]

Auf diesen von der RATP bzw. der Société nationale des chemins de fer français (SNCF) zum Teil gemeinsam betriebenen Linien[329] ist das dargestellte Bedienungsprinzip sehr stark

überall haltende Fahrten auch für die anderen Äste der RER-Linie A mit ebenfalls negativem Ergebnis untersucht - Grund war stets die daraus resultierende ungleichmäßige Verteilung der Fahrgäste.

327 Auf der Linie werden nur Fahrzeuge der Baureihen MI79 und MI84 eingesetzt. Die Linie E wird nur mit Triebzügen der Baureihe MI2N betrieben.

328 Auch die Auswirkungen der alternierenden Bedienung sind erkennbar: In Le Vesinet-Le Pecq beginnen Verstärkerzüge. An den beiden folgenden Stationen hält jeweils nur eine Zuggruppe, so dass das Angebot gleichmäßig ist. In Rueil-Malmaison ergibt sich wieder eine ungleichmäßige Verteilung, da hier beide Zuggruppen halten, jedoch nicht im gleichmäßigen Abstand.

329 Seit der Inbetriebnahme der Verbindung der Netze von RATP und SNCF in den 1970er Jahren bis 2009 wurde auf der Linie B an der Station Gare du Nord, wo beide Infrastrukturen aufeinandertreffen, stets der Triebfahrzeugführer gewechselt (STIF 2013, S. 13) - in der HVZ alle drei Minuten pro Richtung an einer Bahnsteigkante. (Debièvre u. a. 2009) Auf der Linie A werden nur die Äste nach Poissy und Cergy-Le-Haut ab Nanterre-Préfecture von der SNCF betrieben. Dort wird bis heute der Triebfahrzeugführer gewechselt. Die Linie E wird allein von der SNCF betrieben.

Tabelle 4.6.1: Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in Paris.

Bezeichnung	Sitzplätze	Traktion	Masse [t]	V_{max} [km/h]	Länge [m]	Cluster Referenz-fahrzeuge
MI79 oder MI84 (Doppeltraktion)	600	Elektro	416	120	208	NV 300 E (5), NV 300 E (5)
MS61 (Dreifachtraktion)	876	Elektro	444	100	220	NV 200 E (3), NV 200 E (3), NV 200 E (3)
MI2N oder MI09 (Doppeltraktion)	1896	Elektro	576	120	224	NV 600 E (Dosto) (8), NV 600 E (Dosto) (8)

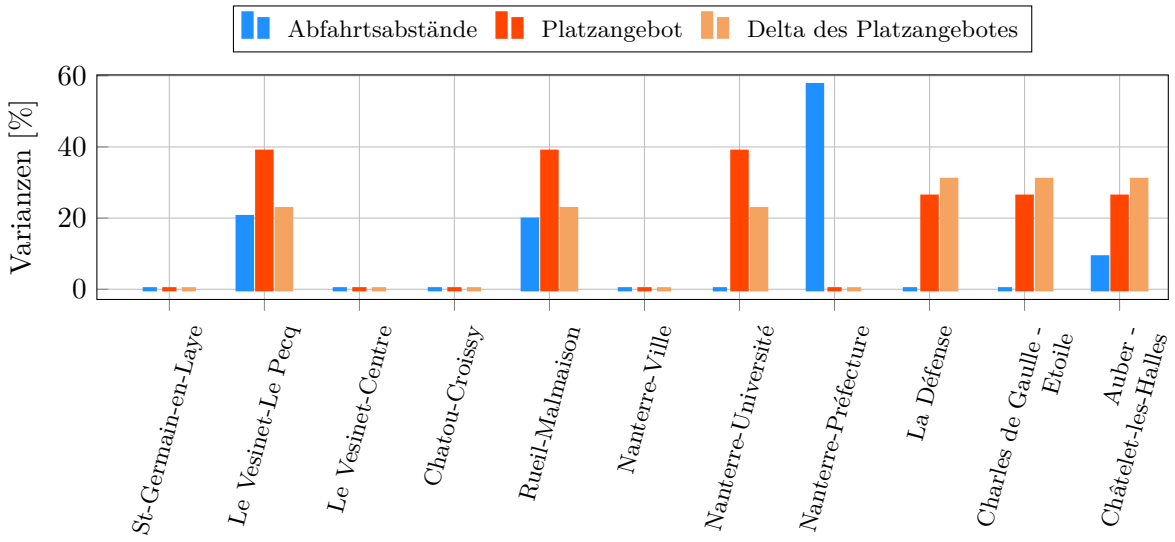

Abbildung 4.6.5: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast St-Germain-en-Laye - Châtelet-les-Halles in der HVZ.

ausgeprägt.[315] Auf den anderen nur von der SNCF betriebenen RER- und Transilien-Linien wird es ebenfalls angewandt, jedoch zum Teil in deutlich vereinfachter Form, weshalb der Fokus der detaillierten Betrachtung auf den Linien A, B und E liegt.

Diese drei Linien haben vom Stadtzentrum aus betrachtet jeweils zwei bis drei Streckenäste, auf denen sich null bis zwei Zwischenendstellen befinden. Insgesamt ergeben sich acht Zwischenendstellen, was bei 19 Endstellen einem Anteil von 42% entspricht. Die Äste der RER A sind gemessen ab der zentralen Station Châtelet-les-Halles zwischen 22,2 und 39,38 km lang. Auf der RER B ist der kürzeste Streckenast nach Robinson 13,8 km lang, der längste nach Saint-Rémy-lès-Chevreuse 32,9 km. Die beiden Äste der Linie E sind 42,1 und 19,64 km lang. (Blier 1993, S. 25ff.); (o.A. 2011a, S. 6)

Abbildung 4.6.6 zeigt die bestimmten Vergleichsparameter für die drei Linien. Es zeigt sich deutlich, dass im zentrumsnahen Bereich das Angebot durch zusätzliche Zugfahrten und den Einsatz längerer Züge verdichtet wird. Die Zahl der Stationshalte erhöht sich jedoch nur teilweise, da durch alternierende Bedienung an einigen (auch zentrumsnahen) Stationen die Zahl der Halte auch in der HVZ unverändert bleibt.

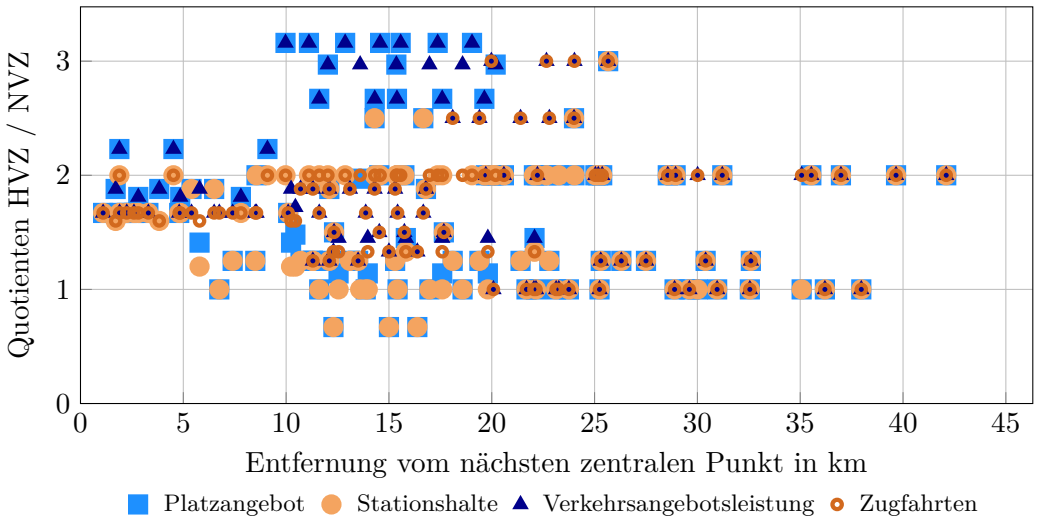

Abbildung 4.6.6: Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei der RER Paris.

An 68 Prozent aller Stationen ergibt sich ein gleichmäßiges Fahrtenangebot, welches zum Teil durch die beschriebene *skip-stop operation* erreicht wird. So gewährleisten die haltenden Züge an mehreren Zwischenhalten der östlichen RER A eine Bedienung alle fünf Minuten, bevor sie sich durch wechselweises Auslassen von Zwischenhalten in das Zwei-Minuten-Raster der Stammstrecke einfädeln. Die restlichen Stationen werden jedoch sehr ungleichmäßig bedient -

mitunter mit zwei Fahrten innerhalb von vier Minuten und dann einer Lücke von über zehn Minuten, was im Maximum zu einer Varianz der Abfahrtsabstände von 79 Prozent führt.

Betrachtet man die Reisezeiteinsparungen in Tabelle 4.6.2, bietet sich ein differenziertes Bild. Auf der Linie A ergibt sich auf den ausschließlich dieser Linie zur Verfügung stehenden Infrastruktur ein Reisezeitgewinn von etwa 1,5 Minuten pro ausgelassenem Halt. Auf den Ästen nach Poissy und Cergy-le-Haut, auf denen die Gleise mit dem übrigen Regional-, Fern- und Güterverkehr geteilt werden, ergeben sich niedrigere Werte. Ähnlich ist die Situation auf der RER-Linie B. Während auf den südlichen Abschnitten (Orsay-Ville - Cité Universitaire) die Einsparung pro ausgelassenem Zwischenhalt bei knapp einer Minute liegt,[330] zeigt sich zwischen Gare du Nord und dem Flughafen Roissy Charles de Gaulle im Norden ein anderes Bild. Hier werden neun Zwischenhalte mit zum Teil längeren Stationsabständen ausgelassen und dennoch liegt die Einsparung bei lediglich fünf Minuten. Die Trasse für diese Züge wurde zwischen den häufiger haltenden Zügen mit einer geringeren Geschwindigkeit so konstruiert, dass keine Überholungen notwendig sind, und enthält einen großzügigen Fahrzeitpuffer. Hintergrund dieser Expressfahrten ist weniger die Reduktion der Reisezeit zum Flughafen. Diese ist mit 30 statt 35 Minuten weiterhin relativ lang.[331] Vielmehr erfolgt so eine Reisendenlenkung, da die Expresszüge zum Flughafen nicht von den Reisenden aus den durchfahrenen Vororten genutzt werden können.[332] Der Anteil der von den Expresszügen ausgelassenen Stationen bewegt sich im Bereich zwischen elf und 45 Prozent. Neben eher Skip-Stop-Bedienung auf den eher innenstadtnahen Bereichen gibt es auch ausgesprochene Expresszüge auf den Linien B und E.[333]

Die Höchstgeschwindigkeit auf der RER-Linie A beträgt auf den meisten Abschnitten 100 km/h. Auf einzelnen Abschnitten auf den Ästen nach Poissy und Marne-la-Vallée sind 120 km/h zulässig. (STIF 2012, S. 12) Auf der RER-Linie B liegt die zulässige Geschwindigkeit zwischen 40-70 km/h in den Einfahrbereichen einiger Bahnhöfe und 100-120 km/h auf den Außenästen. (STIF 2013, S. 28)

Auf der Linie A ist die stärkere Lastrichtung morgens in Ost-West- und nachmittags in West-Ost-Richtung. Entsprechend verkehren in Hauptlastrichtung bis zu 30 Züge pro Stunde, entgegen der Lastrichtung nur bis zu 24 Züge. (STIF 2012, S. 16f.) Dabei gibt es in beiden HVZ

[330] Stationsdurchfahrten erfolgen bei der RER B mit Streckengeschwindigkeit.

[331] Eine Verkürzung der Reisezeit wird mit dem seit Jahren diskutierten Neubauprojekt *CDG-Express* angestrebt. Vgl.u. a. o.A. (2006).

[332] Anzumerken ist, dass diese Non-Stop-Züge mittlerweile nur noch außerhalb der HVZ verkehren, da die RER B ansonsten seit 2013 im Norden stets mit allen Zügen an allen Stationen hält.

[333] Dies betrifft z. B. die Abschnitte Aulnay-sous-Bois - Gare du Nord (B, 45%) und Villiers-sur-Marne - Rosa Parks (E, 38%).

Tabelle 4.6.2: Reisezeitgewinne auf den RER-Linien A,B, und E in der morgendlichen HVZ stadteinwärts.

Anzahl Fahrten	Abschnitt	t (m. Halt)	t (o. Halt)	Δ Halte	$\Delta t_{R,abs}$	η_D
4	Villiers-sur-Marne - Rosa Parks	27	16	6	11	0.38
5	Bourg-la-Reine - Laplace	6	4	2	2	0.12
4	Aulnay-sous-Bois - Le Bourget	7	4	2	3	0.17
4	Aulnay-sous-Bois - La Plaine - Stade de Fr.	13	7	4	6	0.36
4	Aulnay-sous-Bois - Gare du Nord	19	12	5	7	0.45
4	Aulnay-sous-Bois - Gare du Nord	19	13	4	6	0.33
4	Le Bourget - Gare du Nord	12	9	2	3	0.29
5	Orsay-Ville - Gentilly	33	23	10	10	0.37
6	Le Vesinet-Le Pecq - Rueil-Malmaison	6	4	2	2	0.2
6	Torcy - Neuilly-Plaisance	8	7	2	1	0.14
6	Achères-Ville - Nanterre-Préfecture	17	16	2	1	0.15
5	Massy-Palaiseau - Cité Universitaire	19	13	6	6	0.27
6	Rueil-Malmaison - La Défense	9	7	2	2	0.18
6	Lognes - Val-de-Fontenay	11	8	2	3	0.18
6	Maisons-Lafitte - Houilles-Carrieres	5	4	1	1	0.11
6	Marne-la-Vallée - Noisy-le-Grand	17	12	3	5	0.21

jeweils eine Gruppe von Taktzügen, die nur in einer Richtung ohne Pendant verkehren, weshalb sich der Fahrzeugausgleich nur über den gesamten Tag unter Berücksichtigung beider HVZ ergibt. Jeweils *nach* der Durchquerung der Innenstadt ergibt sich so das Phänomen, dass in Lastrichtung weniger Züge (24) als in Gegenrichtung (30) verkehren.

Auf der Linie B verkehren entgegen der Lastrichtung[334] die über die Grundbedienung hinausgehenden Fahrten im nördlichen Bereich zwischen dem Ende der Stammstrecke und dem Einsatzpunkt der Verstärkungsfahrten in Lastrichtung als Leerfahrten, so dass durch die Nachfrage entgegen der Lastrichtung nicht gerechtfertigte Einsatzzeit für Fahrzeuge und Personale eingespart werden kann.

Seit 2005 gibt es auf der Linie B keine Zuglängenunterschiede im Tagesverlauf.[335] Zuvor wurden die Züge am Vormittag und in den Abendstunden in Einzeltraktion gefahren. Auf der Linie A wird ebenfalls tagsüber mit maximaler Zuglänge gefahren.[336]

Auf der Linie B bestehen alle Züge aus dem gleichen einstöckigen Fahrzeugmaterial[337] mit annähernd gleichem Platzangebot. Auf der Linie A werden drei Fahrzeugtypen eingesetzt, darunter auch Doppelstockfahrzeuge, so dass von unterschiedlichem Platzangebot auszugehen ist.[338] Auf der Linie A ergibt sich so nur bei etwa 60 Prozent der Stationen eine gleichartige Verteilung des Platzangebotes. Über beide Linien zusammen sind es 72 Prozent. An den übrigen Stationen wechseln sich Doppelstockzüge mit hoher Kapazität von etwa 2600 Sitz- und Stehplätzen und einstöckige Züge mit nur etwa 1700 Sitz- und Stehplätzen ab.

Die Abbildungen 4.6.7 bis 4.6.9 sowie Tabellen 4.6.3 bis 4.6.5 fassen alle gesammelten Vergleichsparameter für die betrachteten RER-Linien A, B und E in Paris zusammen. Dabei zeigt sich in allen drei Bereichen eine ausgeprägte Differenzierung. Verkehrlich betrifft dies vor allem

334 Morgens stadtauswärts, nachmittags stadteinwärts.

335 Aussage von Mitarbeitern der RATP, Département RER, Transport Ligne B, im Rahmen des Praktikums des Autors in der Abteilung im Frühjahr 2006. Aufgrund der weiter gestiegenen Nachfrage hat man diese Verdichtung seitdem nicht rückgängig gemacht.

336 Aussagen zur Veränderung der Zuglänge auf der Linie A im Tagesverlauf wollte die RATP auf Nachfrage nicht tätigen. Beobachtungen des Verfassers am 24. November 2013, am 4./5. März und 1. Juli 2014 sowie an mehreren Tagen im Frühjahr 2015 außerhalb der HVZ belegen die Annahme der maximalen Zuglänge bis in die Abendstunden.

337 Es handelt sich um die Baureihen MI79 und MI84 in unterschiedlichen Bauserien mit geringfügigen Unterschieden.

338 Die RATP sah sich jedoch nicht in der Lage, auf mehrere Nachfragen hin eine Auskunft zum aktuellen Einsatz der unterschiedlichen Baureihen zu geben. Dem hier genannten Wert liegt die folgende Annahme aus dem Fahrplanjahr 2006 zu Grunde: Bei vergleichbarem Fahrplankonzept wurden auf dem Ast nach Boissy-Saint-Léger überwiegend Fahrzeuge der Baureihe Mi61 in Dreifachtraktion eingesetzt, die beinahe so viele Plätze bieten wie die Doppelstockzüge. Die Fahrten nach Rueil-Malmaison und Cergy-le-Haut wurden mit der Baureihe MI2N in Doppeltraktion gefahren und die verbleibenden Äste nach Poissy und Le Vésinet wurde mit Doppeltraktionen der Baureihe MI84 bedient. Da diese durch die neuen Doppelstocktriebzüge MI09 mittlerweile nahezu vollständig an die Linie B abgegeben wurden, wird unterstellt, dass die 2006 noch von MI84 bedienten Fahrten mittlerweile mit Doppeltraktionen MI09 gefahren werden.

die Erhöhung des Platzangebotes und der Stationshalte, verbunden mit einer zumindest im Maximum hohen Varianz der Abfahrtsabstände und Platzangebote. Weiterhin erfordern die alternierenden Haltekonzepte zahlreiche Umstiege. Betrieblich ist neben der hohen Belastung auf den Stammstrecken der hohe Anteil an Expressfahrten sowie die im Maximum vergleichsweise hohe Anzahl in direkter Folge ausgelassener Halte zu nennen. In der wirtschaftlichen Betrachtung sind mehrere Parameter besonders ausgeprägt, da die Züge in Paris eine sehr hohe Kapazität bieten und entsprechend auch vergleichsweise lang sind, was sich in den Kosten und Erlösen niederschlägt.

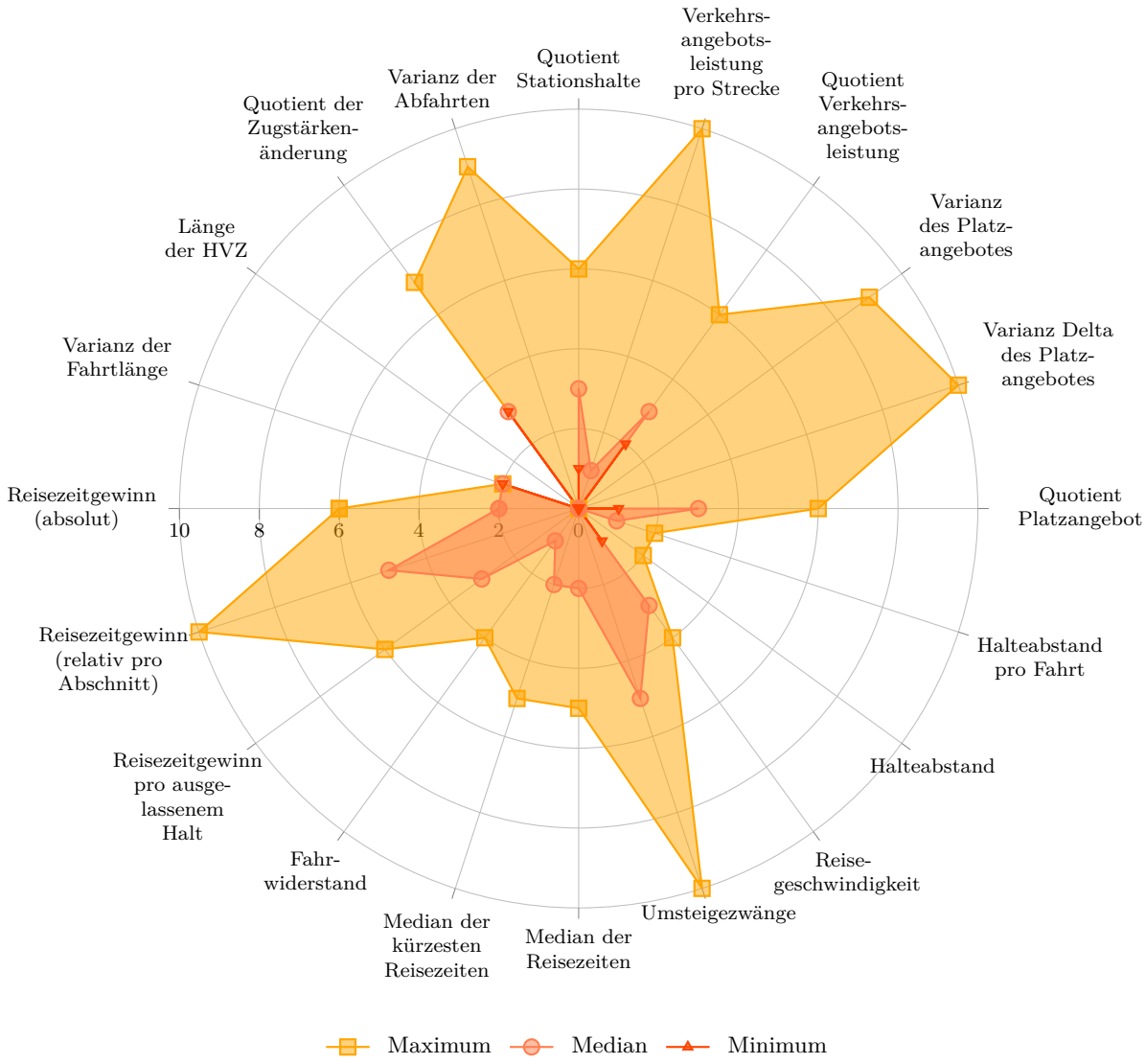

Abbildung 4.6.7: Verkehrliche Vergleichsparameter RER-Linien A, B und E in Paris.

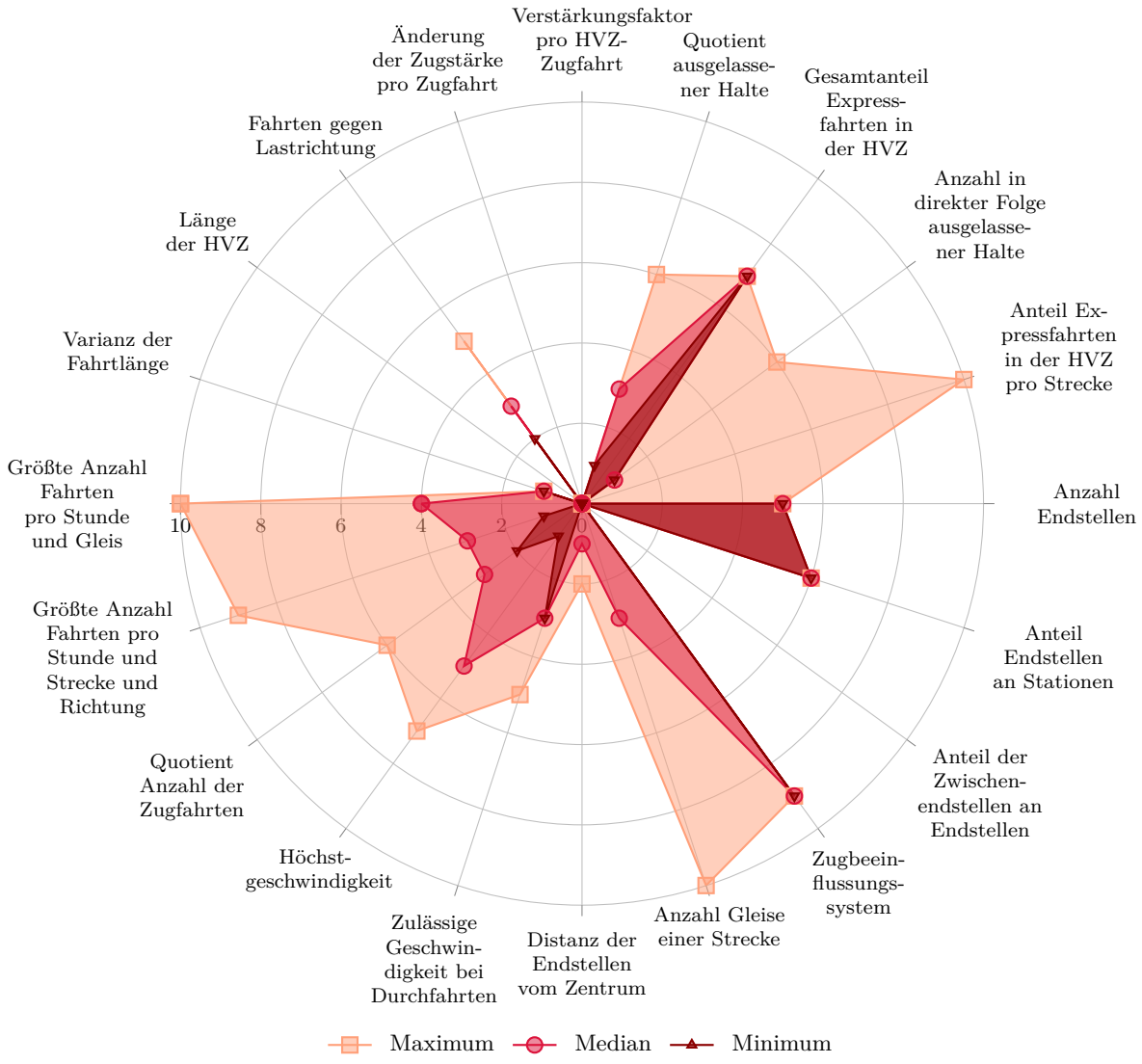

Abbildung 4.6.8: Betriebliche Vergleichsparameter RER-Linien A, B und E in Paris.

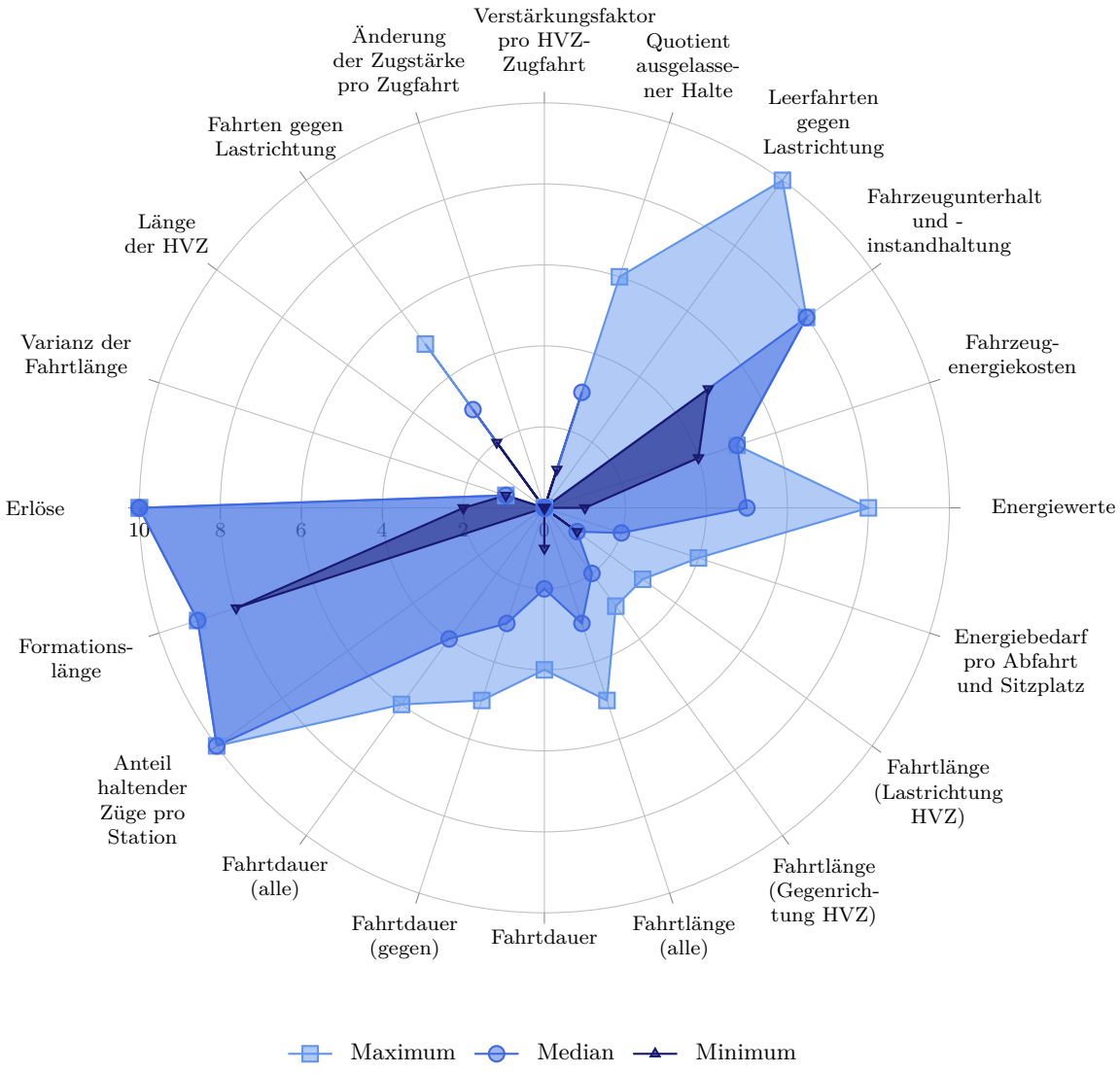

Abbildung 4.6.9: Wirtschaftliche Vergleichsparameter RER-Linien A, B und E in Paris.

Tabelle 4.6.3: Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien der RER-Linien A, B und E in Paris.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrwiderstand [EUR/Platz-h]	L_i	0	7	17
Halteabstand [km]	l_H	0,60	2,04	14,42
Mittlerer Halteabstand pro Fahrt [km]	$\overline{l_H}$	1,04	2,85	4,82
Median der kürzesten Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,k}}$	1	39	101
Median der Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,g}}$	1	32	113
Reisezeitgewinn (absolut) [Min.]	$\Delta T_{R,abs}$	0	2	7
Reisezeitgewinn (relativ, pro Abschnitt) [%]	$\Delta T_{R,rel}$	0	27	50
Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt [Min.]	t_{aH}	0	1	3
Reisegeschwindigkeit pro Fahrt [km/h]	v_R	30,00	49,06	59,88
Umsteigezwänge	N_U	0	1	2
Quotient der Zugstärkenänderung	η_{ZG}	1	1	2
Quotient Platzangebot	η_P	1	2	3
Quotient Stationshalte	η_S	1	2	3
Quotient der Verkehrsangebotsleistung	η_V	1	2	3
Varianz des Deltas des Platzangebotes [%]	$\nu_{\Delta P}$	0	0	31
Varianz der Abfahrten [%]	ν_Z	0	0	79
Varianz des Platzangebotes [%]	ν_P	0	0	39
Verkehrsangebotsleistung pro Strecke [10^3 Platzkm]	P_V	2,40	24,93	227,31

Tabelle 4.6.4: Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien der RER-Linien A, B und E in Paris.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde und Gleis [pro h und Gleis]	$N_{ZZ,G,max}$	2	12	30
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde, Strecke und Richtung [pro h und Richtung]	$N_{ZZ,S,max}$	4	12	30
Quotient Anzahl der Zugfahrten	η_F	1	2	3
Anzahl Gleise einer Strecke	N_G	1	2	4
Distanz der Endstellen vom Zentrum [km]	l_N	13,50	30,96	42,10
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	v_{max}	50	100	120
Zugbeeinflussungssystem	ZUB		100.100	
Zulässige Geschwindigkeit bei planmäßigen Durchfahrten [km/h]	$v_{max,D}$	90	100	120
Änderung der Zugstärke pro Zugfahrt	N_{ZH}	0	0	0
Anteil der Zwischenendstellen an Endstellen [%]	η_{ZE}		42,11	
Anteil Endstellen an Stationen [%]	η_E		16,67	
Anteil Expressfahrten in der HVZ pro Strecke [%]	$\eta_{Ex,S}$	0,00	0,00	100,00
Anzahl Endstellen	N_E		19	
Anzahl in direkter Folge ausgelassener Halte	N_D	1	1	5
Quotient Zugfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,G}$	1	1	2
Gesamtanteil Expressfahrten in der HVZ [%]	η_{Ex}		69,83	
Länge der HVZ [h]	t_{HVZ}		2	
Quotient ausgelassener Halte	η_D	0,11	0,20	0,45
Varianz der Fahrtlänge [%]	ν_N		32,92	
Verstärkungsfaktor pro HVZ-Zugfahrt	l_{ZH}	1	1	1

Tabelle 4.6.5: Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien der RER-Linien A, B und E in Paris.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrterlöse [EUR/Zugkm]	E	114,00	360,24	360,24
Formationslänge [m]	l_{Zug}	208	220	224
Anteil haltender Züge pro Station [%]	η_{DH}	0,20	1,00	1,00
Energiebedarf pro Abfahrt und Sitzplatz [kJ/Platz]	$E_{B,S}$	1,48	8,50	16,31
Energiebedarf pro Abfahrt und Zuglängenmeter [kJ/m]	$E_{B,Z}$	9,83	46,97	71,98
Fahrtdauer (Last- und Gegenrichtung HVZ) [Min.]	t_{Fahrt}	3	56	88
Fahrtdauer (Gegenrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,G}$	3	32	58
Fahrtlänge (Last- und Gegenrichtung HVZ) [km]	l_{Fahrt}	2	42	75
Fahrtlänge (Gegenrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,G}$	2	22	42
Fahrtlänge (Lastrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,L}$	9	24	42
Fahrtdauer (Lastrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,L}$	11	33	54
Fahrzeugunterhalt und -instandhaltung [EUR/km]	K_{FZ}	2,16	3,12	3,12
Energiekosten [EUR/km]	K_E	1,82	2,20	2,20
Quotient der Leerfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,GL}$	0	0	1

4.7. Caltrain San Francisco

Das Peninsula Joint Powers Board organisiert unter dem Label *Caltrain - Regional Rail Link* den derzeit von Amtrak betriebenen Regionalverkehr auf der 77,46 Meilen[339] langen Strecke San Francisco - San Jose - Gilroy im US-Bundesstaat Kalifornien. Die Strecke[340] führt aus den wachsenden Wohnstädten im südlichen Santa Clara County, durch das Silicon Valley über die Halbinsel nach San Francisco, das die Region dominierende wirtschaftliche Zentrum. (o.A. 2008a, S. 152) Wenngleich die Reisendenzahlen die wirtschaftliche Krise der IT-Branche im Silicon Valley um die Jahrtausendwende deutlich widerspiegeln,[341] konnte durch Einführung von beschleunigten Fahrten sowie einer Ausdehnung des Verkehrsangebotes am Wochenende die Reisendenzahl in den folgenden Jahren wieder auf über zehn Millionen pro Jahr gesteigert werden. (o.A. 2008a, S. 154)

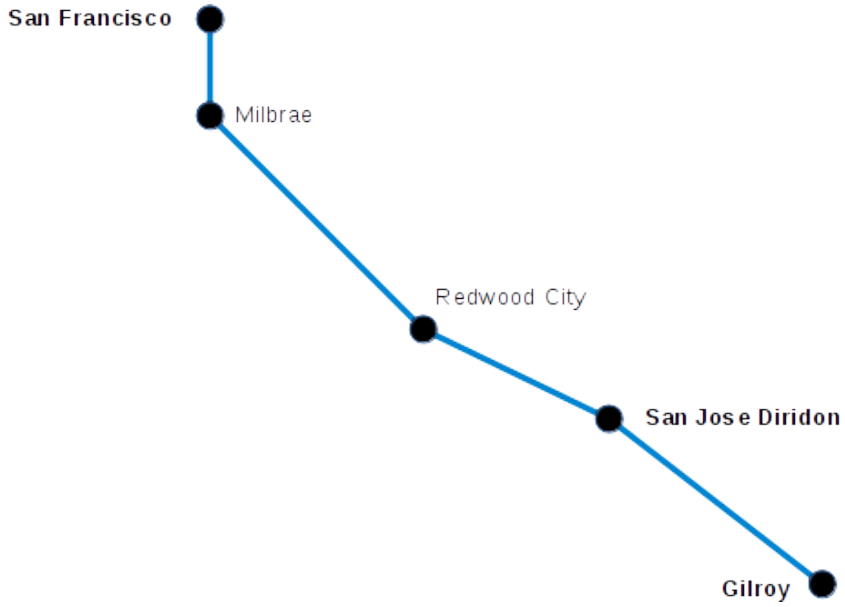

Abbildung 4.7.1: Die Strecke von Caltrain.

Auf der Strecke gibt es in den morgendlichen und nachmittäglichen HVZ ein abgestuftes Verkehrsangebot mit alternierenden Bedienungen und abschnittsweisen Expressfahrten zur Verdichtung des Verkehrsangebotes. Dabei bedienen alle Züge den Hauptteil der Strecke von San Jose Diridon nach San Francisco. Ausschließlich in der HVZ beginnen einzelne Züge bereits in Gilroy bzw. Tamien. Entgegen der Lastrichtung gibt es morgens und abends auf dem Abschnitt Gilroy - Tamien keine Fahrgastfahrten, so dass das Angebot hier in der HVZ unpaarig

339 Mit 1 mi = 1,6093 km ergeben sich 124,66 km.
340 Siehe Abbildung 4.7.1.
341 Von ca. sechs Millionen Reisenden Anfang der 1990er Jahre wuchs die Zahl kontinuierlich bis auf 10,5 Millionen Reisende in 2001. In den Jahren 2002 und 2003 sank sie auf gut acht Millionen pro Jahr.

ist. Außerhalb der HVZ sowie am gesamten Wochenende wird nur der Abschnitt ab San Jose Diridon stündlich von an allen Stationen haltenden sogenannten *Local Trains* befahren.[342] In der Zufahrt auf San Francisco ergeben sich pro Stunde in der HVZ fünf Fahrten.[343] Die Züge beginnen in Gilroy, Tamien oder San Jose Diridon.

Sogenannte *Baby Bullet Trains* verkehren zwischen Tamien bzw. San Jose und San Francisco mit einzelnen Zwischenhalten, um zwischen den beiden großen Städten Verbindungen mit einer Fahrzeit von weniger als 60 Minuten anzubieten. Zur lokalen Erschließung gibt es sogenannte *Limited Trains*, die nur einzelne Zwischenstationen auslassen und auf der Reststrecke alle Stationen bedienen. Beispielhaft zeigt die Netzgrafikdarstellung in Abbildung 4.7.4 dieses sich stündlich wiederholende Schema zwischen sechs und acht Uhr.[344] Die zeitliche Verteilung der Halte ist an den einzelnen Stationen unterschiedlich. Abgesehen von der Station Lawrence gibt es an allen Stationen in der HVZ jeweils in beiden Stunden das gleiche Angebot. Dieses ist überall dort, wo genau ein Zug pro Stunde hält folglich gleichmäßig.[345] An der Mehrheit der Stationen gibt es eine ungleichmäßige Verteilung der Halte - meist zwei Fahrten binnen etwa 20 Minuten und keine weitere Abfahrt in der restlichen Stunde.[346]

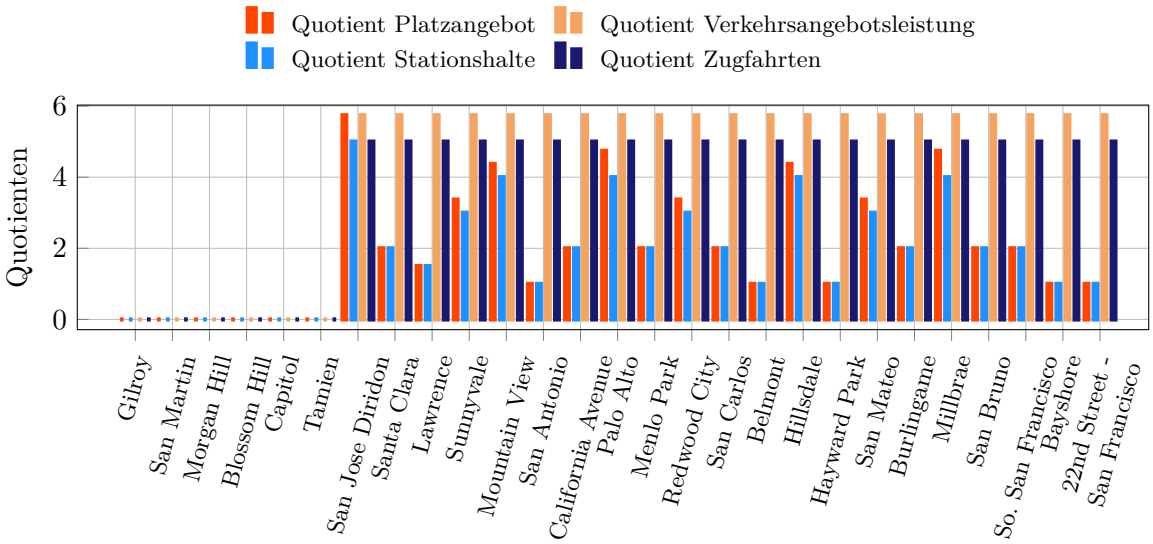

Abbildung 4.7.2: Quotienten auf dem Ast Gilroy - San Francisco in der HVZ.

342 Aufgrund rückläufiger Subventionen wurde das Verkehrsangebot in den vergangenen Jahren eingeschränkt. Vgl. Eskenazi (2010).

343 Dieselbe Anzahl ergibt sich auch auf allen anderen Abschnitten ab San Jose Diridon. Vgl. Abbildung 4.7.2.

344 Das Zeitintervall wird durch die Abfahrten in San Jose Diridon begrenzt. Die Ankünfte in San Francisco sind entsprechend später. Der Abstand liegt in San Jose Diridion bei 19 / 23 / 5 / 2 / 6 Minuten zwischen den fünf stündlichen Fahrten. Der Zug ab San Jose Diridon um 07:57 Uhr hält abweichend vom Schema in College Park. Abweichungen im Minutenbereich wurden nicht berücksichtigt.

345 Ausnahme ist die Station San Carlos, an der es zwei Halte pro Stunde gibt, die (wohl eher zufällig) im Abstand von 30 Minuten liegen.

346 Vgl. Abbildung 4.7.3 auf der nächsten Seite.

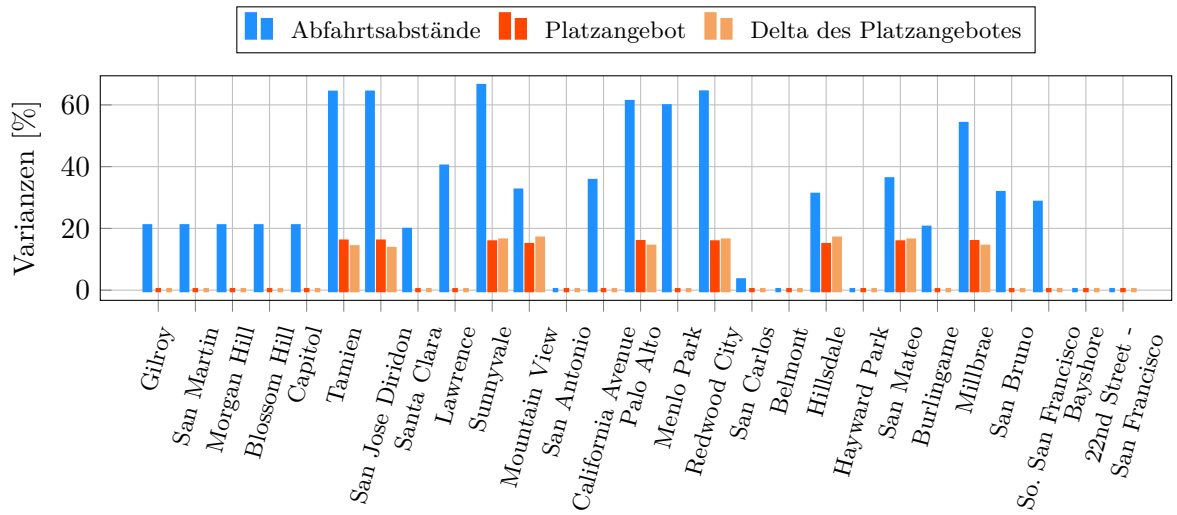

Abbildung 4.7.3: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Gilroy - San Francisco in der HVZ.

Die von den *Baby Bullet Trains* bedienten zehn Stationen decken insgesamt 83 Prozent aller werktäglichen Ein- und Aussteiger ab. (o.A. 2014b, S. 6) Wenngleich es eine stark ausgeprägte Lastrichtung morgens nach San Francisco und nachmittags Richtung Süden gibt, besteht das Fahrtenangebot abgesehen von der Bedienung des äußersten Abschnittes ab Gilroy, der nur in Lastrichtung von je zwei bzw. drei Fahrten bedient wird, auch in der jeweiligen Gegenrichtung, aus derselben Anzahl an Fahrten mit vergleichbarer Bedienung der Zwischenstationen.

Zum Einsatz kommen Zugverbände entweder mit fünf älteren sogenannten *Gallery Cars* oder sechs jüngere Wagen der Firma Bombardier.[347] Bei beiden Typen handelt es sich um Doppelstockwagen. Die Züge werden von einer Diesellokomotive gezogen oder geschoben. Die Wagentypen unterscheiden sich im Sitzplatz- und Fahrradstellplatzangebot. Es gibt die Bestrebung, auf den Expresszügen primär Bombardierzüge einzusetzen, die ein größeres Sitzplatzangebot haben.[348] Für die Betrachtung wurde das Platzangebot der *Gallery Cars* gemittelt auf 565 Plätze sowie jenes der um einen Wagen verlängerten Bombardier-Züge auf 773.

Die Infrastruktur ist auf der gesamten Strecke zwischen San Jose Diridon und San Francisco zweigleisig. Im südlich gelegenen Abschnitt Gilroy - San Jose Diridon ist die vom Personen-

[347] Siehe Tabelle 4.7.1.

[348] E-Mail-Antwort von Caltrain Kundenservice vom 30. März 2012. Vgl. auch o.A. (2014b, S. 30). Jüngste Pressemitteilungen berichten von einer Ausweitung des Einsatzes der Bombardier-Züge auf Limited-Services, weshalb unterstellt wird, dass mittlerweile alle Baby Bullet-Züge mit Bombardier-Zügen gefahren werden.

Tabelle 4.7.1: Eingesetzte Zugformationen und zugeordnete Referenzfahrzeugcluster in der HVZ in San Francisco.

Bezeichnung	Sitzplätze	Traktion	Masse [t]	V_{max} [km/h]	Länge [m]	Cluster Referenz-fahrzeuge
Gallery Set	565	Diesel	370	128	210	Lok NV D + 7 Dosto (6)
Bombardier Set	773	Diesel	420	128	240	Lok NV D + 8 Dosto (7)

verkehr nutzbare Strecke eingleisig.[349] An einigen Stationen[350] gibt es viergleisige Abschnitte, in denen planmäßig Überholungen stattfinden.[351] Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt derzeit 128 km/h. (o.A. 2016b) Auf der Strecke gibt es ortsfeste Signale, jedoch - wie bis heute in den USA üblich - kein Zugbeeinflussungssystem.[352]

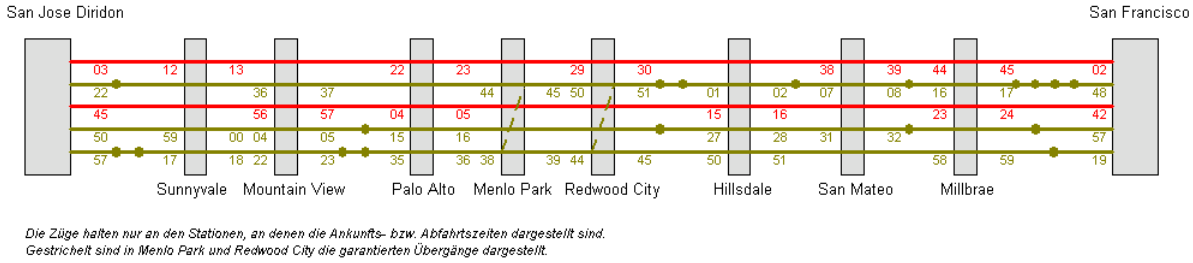

Abbildung 4.7.4: Netzgrafikausschnitt Caltrain für nordwärts fahrende Züge in der morgendlichen HVZ [eigene Darstellung mit Viriato nach Caltrain (2011)].

Ein weiter differenziertes Fahrplankonzept hat Leister (2011b, S. 131f.) entwickelt. Um Kapazität für den geplanten Hochgeschwindigkeitsverkehr in Kalifornien im Zulauf auf San Francisco zu schaffen, schlägt er vor, die Strecke in drei Abschnitte zu teilen und im *zonal service* zu bedienen. Dabei bedient jeder Zug, wie in Abbildung 4.7.5 dargestellt, ab seinem Anfangsbahnhof alle Zwischenstationen bis zur Anfangsstation des nächsten Zuges. Von dort fährt er ohne Halt bis San Francisco, dem Zielbahnhof der meisten Reisenden. Der nächste einsetzende

[349] Es gibt mehrere zweigleisige Abschnitte, die jedoch aufgrund der nur an einem Gleis befindlichen Bahnsteige nicht nutzbar sind. (o.A. 2016b)

[350] Lawrence, zwischen Menlo Park und Redwood City, Southern San Francisco, Bayshore.

[351] Aus dem Fahrplan ergeben sich in der HVZ Überholungen in Lawrence und im Bereich Southern San Francisco / Bayshore. Vgl. auch Elliott u. Lipfert (2012, S. 15). Bemerkenswert ist die im von Caltrain veröffentlichten Fahrplanfaltblatt besonders hervorgehobene Umsteigemöglichkeit an den Stationen Menlo Park und Redwood City zwischen jeweils zwei *Limited Trains*, um attraktive Verbindungen von jeder Station im südlichen Streckenabschnitt zu jeder Station im nördlichen Streckenabschnitt zu ermöglichen.

[352] Vgl. Elliott u. Lipfert (2012, S. 20) sowie Aussage per E-Mail am 20. Februar 2015 von Thomas White, http://dslweb.nwnexus.com/tawhite/about.htm (Zugriff am 26. April 2017).

Zug verfährt entsprechend. Auf der Gesamtstrecke gäbe es damit zwei zusätzliche Zwischenendstellen.

In Elliott u. Lipfert (2012, S. 34ff.) wird ein anderes mögliches zukünftiges Betriebskonzept beschrieben. Bei dann sechs stündlichen Fahrten, die weiterhin den gesamten Korridor befahren, könnte eine sogenannte *skip stop zone express service* Strategie angewendet werden. Dies bedeutet, dass die Halte zwischen den sehr aufkommenstarken Stationen, an denen alle Züge halten, jeweils abwechselnd bzw. von einigen Zügen gar nicht bedient werden. Auf der Gesamtstrecke würde sich durch diese Haltestrategie bei allen sechs Fahrten in etwa die gleiche Reisezeit ergeben.[353]

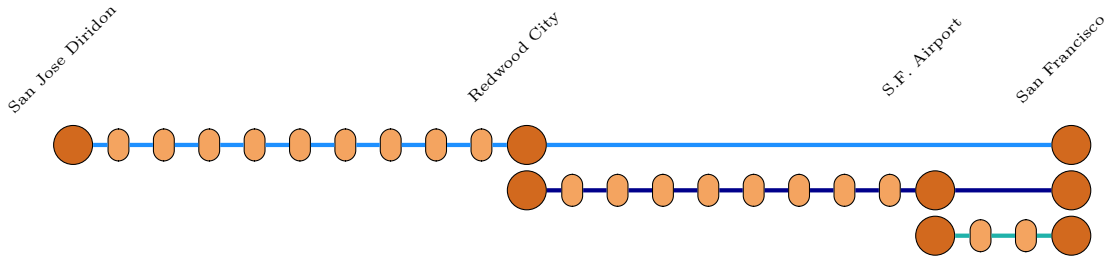

Abbildung 4.7.5: Entwurf eines Bedienkonzepts der Caltrain-Züge (Darstellung nicht maßstäblich) [eigene Darstellung nach Leister (2011b, S. 131f.)].

Herausstechend bei den Vergleichskriterien ist die Verfünffachung der Anzahl an Zugfahrten auf der Strecke zwischen San Jose Diridon und San Francisco, da außerhalb der HVZ die Strecke nur von einem an allen Stationen haltenden Zug pro Stunde bedient wird.

Tabelle 4.7.2: Reisezeitgewinne bei Caltrain in der morgendlichen HVZ nordwärts.

Anzahl Fahrten	Abschnitt	t (m. Halt)	t (o. Halt)	Δ Halte	$\Delta t_{R,abs}$	η_D
2	San Jose Diridon - San Francisco	92	57	16	35	0.76
2	San Jose Diridon - San Francisco	92	59	15	33	0.68
2	San Jose Diridon - San Francisco	80	54	11	26	0.52
1	Santa Clara - Menlo Park	31	18	5	13	0.24
1	Lawrence - Menlo Park	26	15	4	11	0.15
2	Redwood City - San Francisco	51	34	8	17	0.3

Durch das Auslassen von bis zu 16 Zwischenhalten ergibt sich bei den *Baby Bullet* genannten Expresszügen eine Reisezeitersparnis von bis zu 37 Prozent und eine auch marketingrelevante Reisezeit auf der Gesamtstrecke von weniger als einer Stunde. Tabelle 4.7.2 zeigt die

[353] Elliott u. Lipfert (2012, Table 7, S. 35) zeigt Fahrzeiten zwischen 62 und 64 Minuten.

unterschiedlichen Reisezeitverkürzungen in Abhängigkeit der ausgelassenen Zwischenhalte. Zu bemerken ist, dass die Ersparnis pro ausgelassenem Zwischenhalt bei den Zügen, die viele Zwischenhalte auslassen, deutlich größer ausfällt als bei den beiden Zugtypen, die nur an fünf bzw. acht Halten durchfahren. Dies dürfte auf den Stationsabstand zurückzuführen sein, der im nördlichen Bereich kurz vor San Francisco kürzer ist und es so den an mehreren dieser Stationen durchfahrenden Zügen ermöglicht, eine höhere Geschwindigkeit ohne Einbrüche beizubehalten. Die letzte Spalte zeigt durch die sehr hohen Werte von bis zu 76 Prozent ausgelassener Halte, wie bedeutend das Mittel der Expresszüge in diesem System eingesetzt wird.

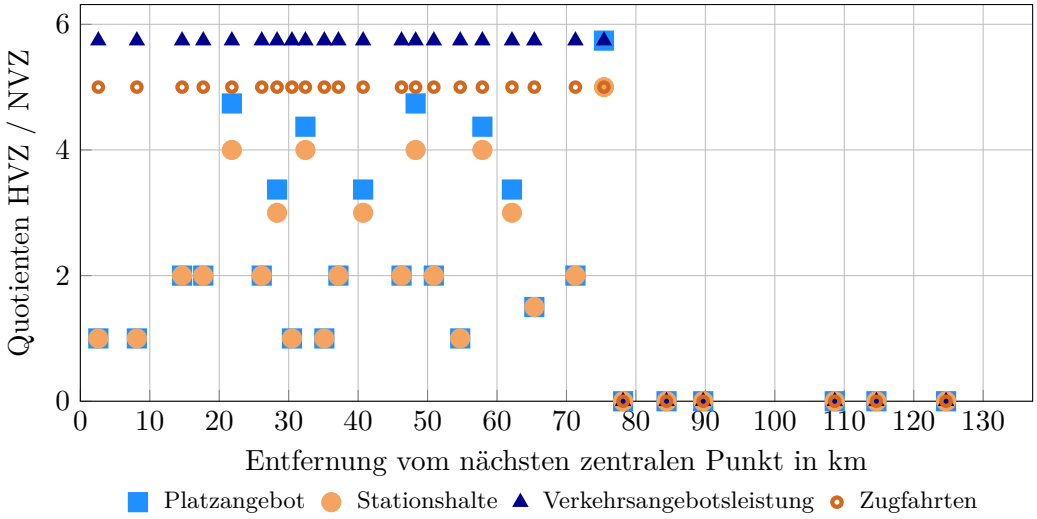

Abbildung 4.7.6: Vergleichsquotienten Platzangebot, Stationshalte, Verkehrsangebotsleistung und Zugfahrten bei Caltrain San Francisco.

Die starke Verdichtung durch zusätzliche Zugfahrten und den verstärkten Einsatz der ein etwas größeres Platzangebot bietenden Züge zeigt sich sehr deutlich in den in Abbildung 4.7.6 dargestellten Quotienten. Es gibt dennoch - auch zentrumsnah - Stationen, die keinerlei Verdichtung durch zusätzliche Halte oder ein größeres Platzangebot erfahren. Auf dem äußeren Abschnitt von San Jose Diridon nach Gilroy gibt es nur in der HVZ ein Verkehrsangebot, weshalb diese Quotienten null ergeben.

Abbildungen 4.7.7 bis 4.7.9 sowie die Tabellen 4.7.3 bis 4.7.5 fassen alle zusammengestellten Vergleichsparameter bei Caltrain zusammen. Die große Differenzierung springt in allen drei Kreisdiagrammen ins Auge. Dies ist zum Teil begründet durch die verglichen mit den anderen Systemen eher geringe Belastung, wodurch kleine Änderungen zu großen Differenzierungen führen.

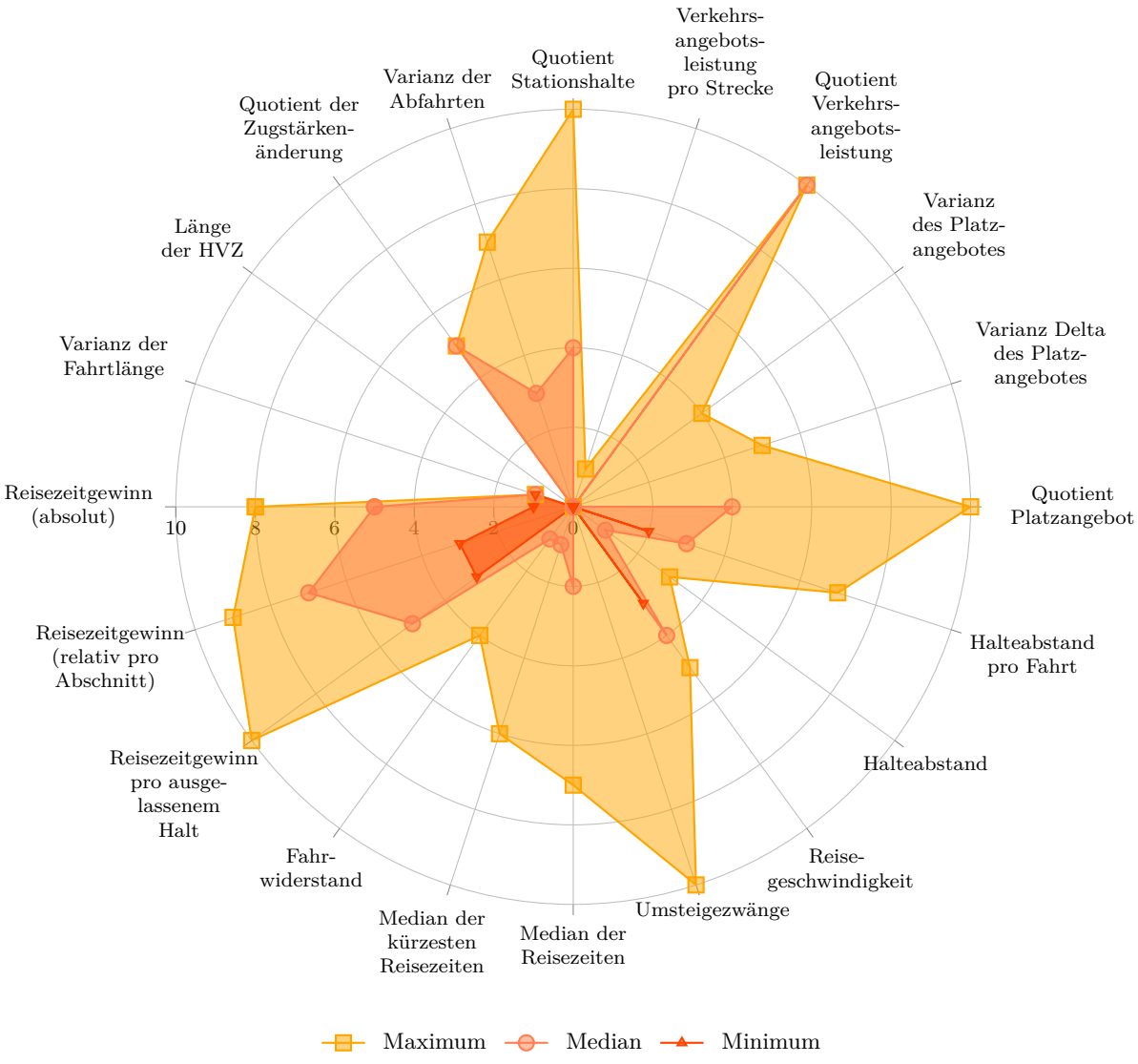

Abbildung 4.7.7: Verkehrliche Vergleichsparameter Caltrain San Francisco.

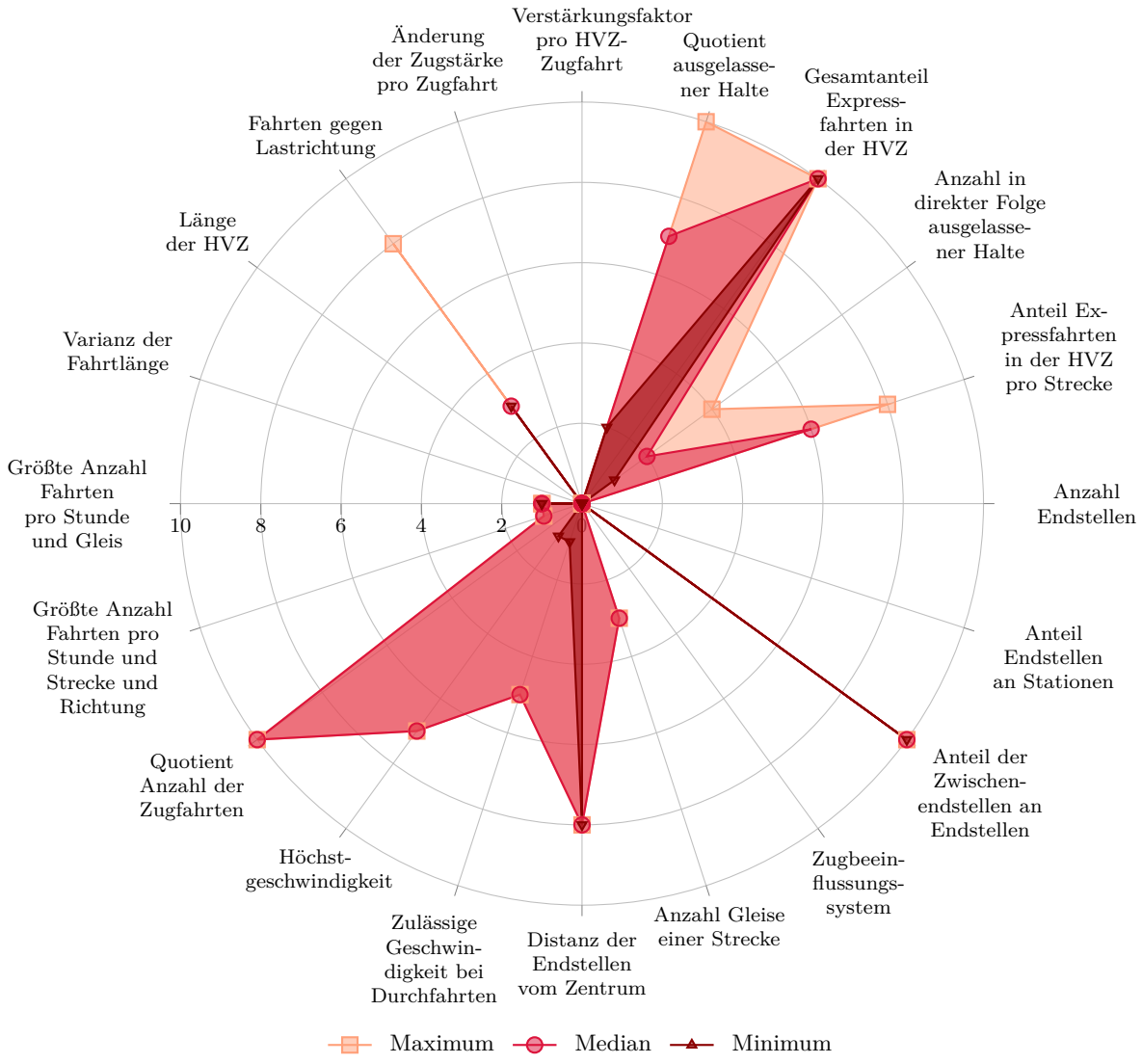

Abbildung 4.7.8: Betriebliche Vergleichsparameter Caltrain San Francisco.

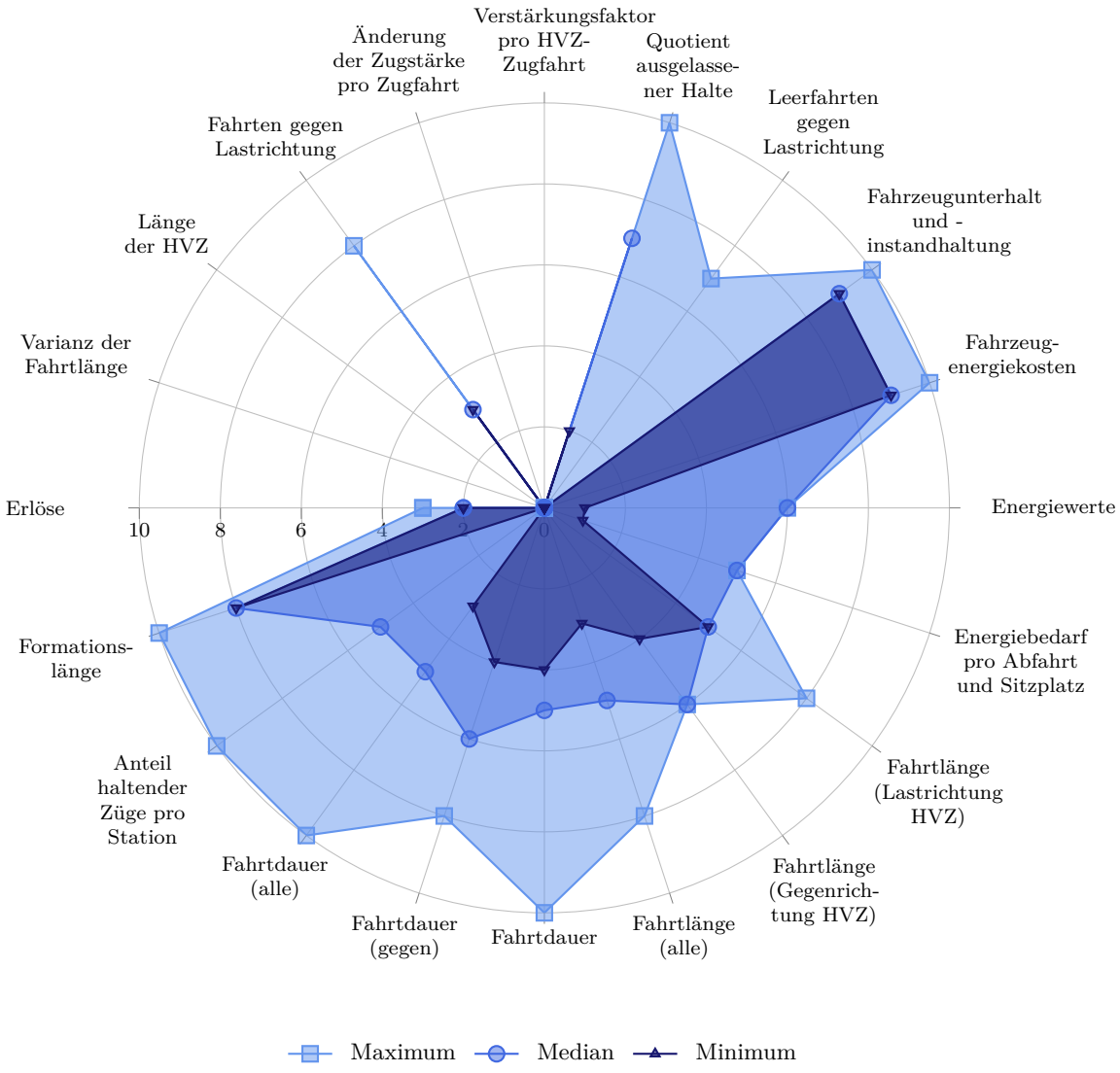

Abbildung 4.7.9: Wirtschaftliche Vergleichsparameter Caltrain San Francisco.

Tabelle 4.7.3: Zusammenfassung der Werte der verkehrlichen Vergleichskriterien bei Caltrain San Francisco.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrwiderstand [EUR/Platz-h]	L_i	0	5	20
Halteabstand [km]	l_H	1,95	5,92	21,82
Mittlerer Halteabstand pro Fahrt [km]	$\overline{l_H}$	4,71	7,54	15,08
Median der kürzesten Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,k}}$	3	30	128
Median der Reisezeiten [Min.]	$\overline{t_{R,g}}$	3	33	142
Reisezeitgewinn (absolut) [Min.]	$\Delta T_{R,abs}$	1	6	10
Reisezeitgewinn (relativ, pro Abschnitt) [%]	$\Delta T_{R,rel}$	13	36	47
Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt [Min.]	t_{aH}	1	2	4
Reisegeschwindigkeit pro Fahrt [km/h]	v_R	52,60	67,52	79,37
Umsteigezwänge	N_U	0	0	2
Quotient der Zugstärkenänderung	η_{ZG}	0	1	1
Quotient Platzangebot	η_P	0	2	6
Quotient Stationshalte	η_S	0	2	5
Quotient der Verkehrsangebotsleistung	η_V	0	6	6
Varianz des Deltas des Platzangebotes [%]	$\nu_{\Delta P}$	0	0	17
Varianz der Abfahrten [%]	ν_Z	0	31	66
Varianz des Platzangebotes [%]	ν_P	0	0	16
Verkehrsangebotsleistung pro Strecke [10^3 Platzkm]	P_V	4,46	10,33	21,07

Tabelle 4.7.4: Zusammenfassung der Werte der betrieblichen Vergleichskriterien bei Caltrain San Francisco.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde und Gleis [pro h und Gleis]	$N_{ZZ,G,max}$	3	5	5
Größte Anzahl Fahrten pro Stunde, Strecke und Richtung [pro h und Richtung]	$N_{ZZ,S,max}$	2	5	5
Quotient Anzahl der Zugfahrten	η_F	0	5	5
Anzahl Gleise einer Strecke	N_G	1	2	2
Distanz der Endstellen vom Zentrum [km]	l_N	124,66	124,66	124,66
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	v_{max}	56	127	127
Zugbeeinflussungssystem	ZUB		1	
Zulässige Geschwindigkeit bei planmäßigen Durchfahrten [km/h]	$v_{max,D}$	64	127	127
Änderung der Zugstärke pro Zugfahrt	N_{ZH}	0	0	0
Anteil der Zwischenendstellen an Endstellen [%]	η_{ZE}		66,67	
Anteil Endstellen an Stationen [%]	η_E		10,71	
Anteil Expressfahrten in der HVZ pro Strecke [%]	$\eta_{Ex,S}$	0,00	60,00	80,00
Anzahl Endstellen	N_E		3	
Anzahl in direkter Folge ausgelassener Halte	N_D	1	2	4
Quotient Zugfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,G}$	1	1	3
Gesamtanteil Expressfahrten in der HVZ [%]	η_{Ex}		100,00	
Länge der HVZ [h]	t_{HVZ}		2	
Quotient ausgelassener Halte	η_D	0,15	0,52	0,76
Varianz der Fahrtlänge [%]	ν_N		24,51	
Verstärkungsfaktor pro HVZ-Zugfahrt	l_{ZH}	1	1	1

Tabelle 4.7.5: Zusammenfassung der Werte der wirtschaftlichen Vergleichskriterien bei Caltrain San Francisco.

Name	Bezeichnung	Min.	Med.	Max.
Fahrterlöse [EUR/Zugkm]	E	107,35	107,35	146,87
Formationslänge [m]	l_{Zug}	210	210	240
Anteil haltender Züge pro Station [%]	η_{DH}	0,20	0,60	1,00
Energiebedarf pro Abfahrt und Sitzplatz [kJ/Platz]	$E_{B,S}$	3,31	20,53	20,53
Energiebedarf pro Abfahrt und Zuglängenmeter [kJ/m]	$E_{B,Z}$	10,67	55,24	55,24
Fahrtdauer (Last- und Gegenrichtung HVZ) [Min.]	t_{Fahrt}	40	68	138
Fahrtdauer (Gegenrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,G}$	40	69	89
Fahrtlänge (Last- und Gegenrichtung HVZ) [km]	l_{Fahrt}	49	75	125
Fahrtlänge (Gegenrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,G}$	49	75	78
Fahrtlänge (Lastrichtung HVZ) [km]	$l_{Fahrt,L}$	75	78	125
Fahrtdauer (Lastrichtung HVZ) [Min.]	$t_{Fahrt,L}$	57	67	138
Fahrzeugunterhalt und -instandhaltung [EUR/km]	K_{FZ}	3,45	3,45	3,84
Energiekosten [EUR/km]	K_E	3,29	3,29	3,61
Quotient der Leerfahrten entgegen der Lastrichtung	$\eta_{F,GL}$	0	0	0

5. Klassifizierung und Vergleich der vorgestellten Systeme

Die in Kapitel 196 vorgestellten Systeme unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht. Wenngleich die Systeme jeweils historisch in ihrem Umfeld gewachsen sind, entweder der Stadtentwicklung folgend oder diese maßgeblich beeinflussend,[354] sollen sie in diesem Kapitel basierend auf den zuvor in Abschnitt 3.2 festgelegten Kriterien miteinander verglichen werden.[355] Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf den Ausprägungen und Auswirkungen abschnittsweiser Expressfahrten auf die Systeme, die sich auf weite Teile des Verkehrssystems von der Kapazität über die Nachfrage bis hin zu der Wirtschaftlichkeit erstrecken.

Die Klassifizierung erfolgt zunächst in den in Abschnitt 3.2 eingeführten Gruppen *Verkehr*, *Betrieb* und *Wirtschaftlichkeit*, bevor in Abschnitt 5.4 eine übergreifende Analyse durchgeführt wird.

5.1. Verkehrliche Klassifizierung

Die verkehrliche Klassifizierung betrachtet die in den Gruppen *Attraktivität* und *verkehrliche Differenzierung* zusammengefassten Vergleichskriterien. Als dritten Teil umfasst dieser Abschnitt einen Exkurs zur *Fahrgastinformation* und fasst bei der Analyse der untersuchten Systeme gemachte Erkenntnisse in diesem Bereich zusammen.

5.1.1. Attraktivität

Vorgestellt wurden Systeme mit ausgeprägten Expressfahrten (meist als *zonal service*), alternierenden Expressfahrten (*skip-stop service*) sowie eines mit keinerlei Haltedifferenzierung. Abbildung 5.1.1 zeigt die Reisezeitgewinne durch das Auslassen von Zwischenstationen - einmal relativ zu der Gesamtfahrzeit der überall haltenden Fahrten und einmal absolut.

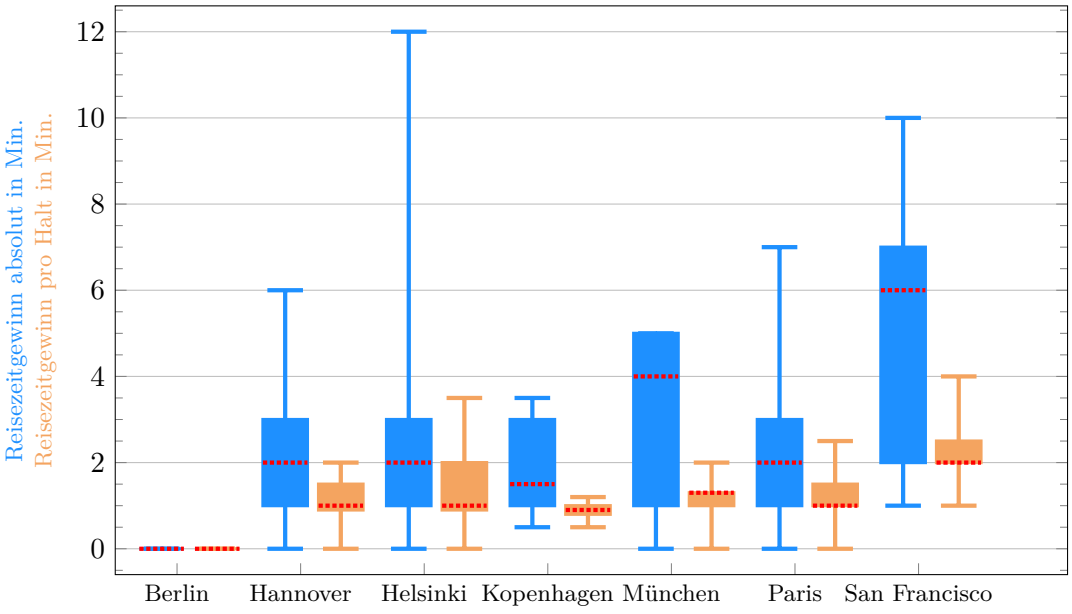

Abbildung 5.1.1: Zusammenfassung der Reisezeitgewinne gegenüber haltenden Zügen.

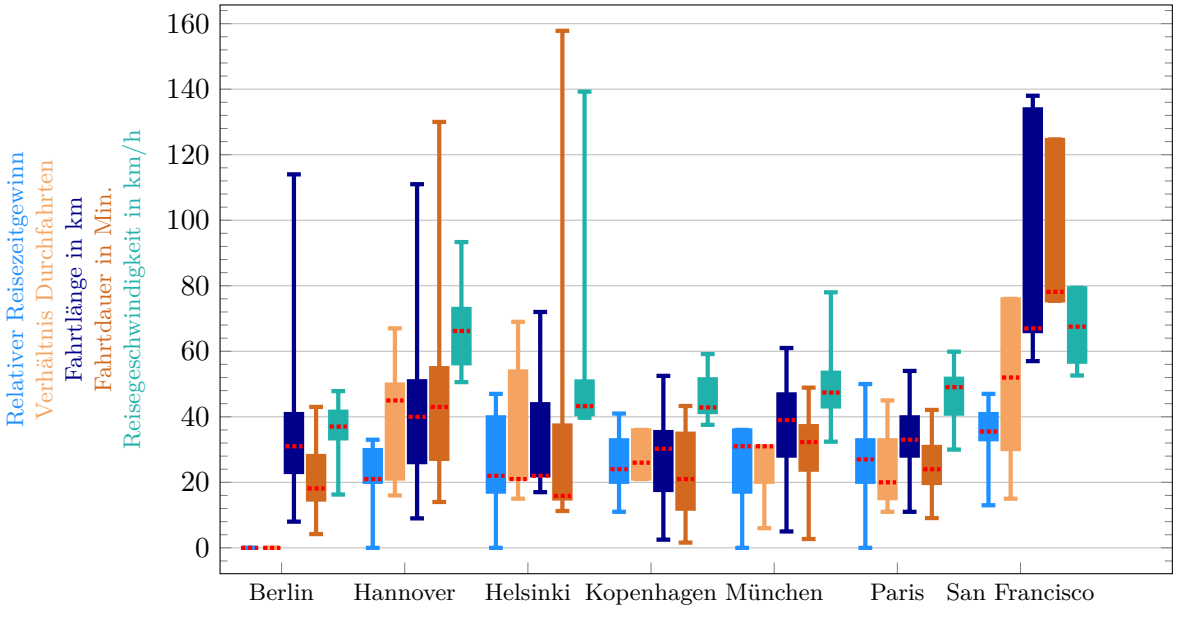

Abbildung 5.1.2: Darstellung von Aspekten zu Reisezeitgewinnen pro Fahrt.

Berlin ist das einzige vorgestellte System, in dem es keinerlei Haltedifferenzierung gibt. In Hannover betrifft die Haltedifferenzierung ebenfalls nur einzelne Linien, die überwiegend nur in der HVZ betrieben werden. Die ausgelassenen Halte in München resultieren aus betrieblichen Zwängen, da nur durch die (leichte) Kürzung der Fahrzeiten die angebotsseitig geforderten Zugzahlen bzw. -folgezeiten auf der bestehenden Infrastruktur erreicht werden können. Andere Systeme wenden dieses Mittel bewusst und aus angebotsplanerischer Sicht in stärkerem Maße an. Aufgrund der Streckenlänge sticht hier Caltrain heraus, wo sich auf der Gesamtstrecke eine um 37% reduzierte Fahrzeit durch das Auslassen von 16 Zwischenhalten ergibt.[356] Relativ gesehen werden in allen Netzen mit ausgelassenen Halten jeweils zwischen 20 und gut 30% der Fahrzeit auf den betreffenden Abschnitten zwischen zwei Haltestationen gewonnen. Die Summe der pro Fahrt ausgelassenen Halte ist hier jedoch kleiner. Hervorstechend bei der Anzahl in direkter Folge ausgelassener Halte sind Helsinki, wo einige Züge[357] bis zu neun Zwischenhalte auslassen, und Hannover, wo die Verstärkerzüge der S51 in direkter Folge sieben Stationen ohne Halt durchfahren. In den übrigen Netzen werden maximal zwischen drei und fünf Stationen hintereinander ausgelassen. Bezogen auf die Gesamtzahl an Stationen entlang der einzelnen Fahrten werden in allen Netzen zwischen 20 und gut 30% der möglichen Zwischenhalte ausgelassen. In Hannover (45%) und San Francisco (52%) ist dieser Anteil deutlich größer, wie Abbildung 5.1.2 in der jeweils ersten Säule zeigt.

Es ist ferner festzustellen, dass die Anwendung von Expressfahrten unabhängig von der Netzausdehnung erfolgt, die bei allen Netzen im Bereich von 25 bis 50 km Entfernung von den gewählten zentralen Punkten liegt.[358]

Die Erwartung, dass ein Zusammenhang zwischen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in einem Netz und dem Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt bestünde, bestätigen die betrachteten Systeme nicht.[359] Ursächlich ist dafür unter anderem, dass die ausgelassenen Stationen nicht immer mit der fahrzeugseitig möglichen Höchstgeschwindigkeit durchfahren werden. Wenngleich in keinem Netz abgesehen von Berlin durchfahrende Züge Bahnsteiggleise nur mit stark verminderter Geschwindigkeit passieren dürfen,[360] liegen die durchfahrenen Stationen

[354] Herausragendes Beispiel ist hier der in Abschnitt 4.4 auf Seite 119 genannte *Fingerplan* in Kopenhagen.
[355] Die Erläuterung der verwendeten Darstellungstypen ist in Kapitel 3.3.2 auf Seite 70 zu finden.
[356] Dies entspricht 32 Minuten Reisezeitgewinn ausgehend von 91 Minuten Gesamtreisezeit der überall haltenden Züge zwischen San Jose Diridon und San Francisco.
[357] Es handelt sich um die sogenannten *EIL*-Züge, die nur in der HVZ in Lastrichtung außerhalb der ansonsten vertakteten Linien verkehren.
[358] Vgl. Abbildung 5.2.3 auf Seite 194. Caltrain San Francisco weist eine größere Länge auf, wird jedoch auch in anderen Bereichen als Ausreißer betrachtet.
[359] Siehe dazu ebenfalls Abbildung 5.2.3 auf Seite 194.
[360] Im Berliner S-Bahn-Netz halten derzeit alle Fahrgastfahrten an allen Stationen. Durchfahrten an Bahnsteigen gibt es lediglich bei Leerreisezügen bzw. einzelnen Güterzügen,die auf kurzen Abschnitten das S-Bahn-Netz befahren. Die zulässige Geschwindigkeit bei Vorbeifahrt an Bahnsteigen ist in der Richtlinie 432 auf 50 km/h begrenzt. (Güttner 2006, Modul 0341, Absatz 3, Satz 2) Als Grund für diese im Vergleich zum

nicht zwingend in den Bereichen, in denen die Höchstgeschwindigkeit des jeweiligen Netzes bzw. der Fahrzeuge erreicht werden kann. Ein geringer Reisezeitgewinn (die jeweiligen Minimalwerte) ist ein Indiz dafür, dass die ausgelassenen Halte eher in Bereichen mit niedrigeren Geschwindigkeiten liegen. Die oberen Werte stammen von Außenästen, auf denen eher die volle Höchstgeschwindigkeit ausgefahren werden kann. Betrachtet man die erhobenen zulässigen Geschwindigkeiten an den durchfahrenen Stationen, liegt die Bandbreite zwischen 60 km/h (Kopenhagen) und 200 km/h (Helsinki).[361]

Die Reisegeschwindigkeit[362] liegt in Berlin mit einem Median von 37 km/h am niedrigsten, was aufgrund der fehlenden Expressfahrten nicht überrascht. Die Netze von Kopenhagen, Helsinki, München und Paris bewegen sich - in dieser Reihenfolge aufsteigend - zwischen 43 und 49 km/h. An der Spitze liegen Hannover und San Francisco mit einem Median von 66 bzw. 67 km/h. Die vergleichsweise hohe Reisegeschwindigkeit hat bei beiden Netzen jedoch unterschiedliche Ursachen, wie Abbildung 5.1.3 zeigt: Der Halteabstand über alle Halte sowie der Mittelwert über alle Fahrten liegen in Hannover im Median beide bei rund vier Kilometern. In San Francisco betragen die Werte 5,92 und 7,54 km. Der Grund sind die dort ausgeprägteren Expressfahrten. Verbunden mit einer insgesamt niedrigeren zulässigen Höchstgeschwindigkeit ergibt sich eine verglichen mit den anderen Netzen höhere Reisegeschwindigkeit. Bei der S-Bahn Hannover ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit zwar größer, sie kann jedoch nur auf einigen wenigen Abschnitten wirklich ausgefahren werden. Der Median der Stationsabstände sowie unteres als auch oberes Quartil liegen in Hannover in einem Bereich von drei bis sechs Kilometern und damit oberhalb der oberen Quartile der anderen Netze mit Ausnahme von San Francisco.[363] In allen Netzen liegt der mittlere Stationsabstand pro Fahrt im Median oberhalb des Median der Halteabstände des gesamten Netzes, was durch die in allen Netzen niedrigen Stationsabstände auf den besonders dicht befahrenen Abschnitten begründet ist. Einen Unterschied zwischen Systemen mit ausgeprägten Expressfahrten (*zonal service*) und solchen ohne jegliche Haltedifferenzierung gibt es nicht.

Der absolute Reisezeitgewinn liegt in allen Netzen zwischen 0 und 4,5 Minuten bei einem Median von einer Minute.[364] Das ist dahingehend bemerkenswert, als dass dieser Wert sich

restlichen Schienennetz, wo Durchfahrten an Bahnsteigen mit bis zu 230 km/h erfolgen dürfen - in Abhängigkeit der zulässigen Geschwindigkeit sind Sicherungsmaßnahmen für die Fahrgäste erforderlich -, sehr starke Restriktion sind einerseits die heutige Zugsicherung der Berliner S-Bahn, die Bahnsteigkonstruktion zur Spaltverminderung beim Fahrgastwechsel sowie die auf den Außenstrecken zahlreich anzutreffenden Bahnübergänge anzuführen.

361 Die Bahnsteige der in Helsinki ausgelassenen Halte liegen jedoch nicht an den Durchfahrtgleisen. Vgl. auch Ausführungen in der betrieblichen Klassifizierung in Abschnitt 397 auf Seite 193.

362 Vgl. Abbildung 5.1.2 auf Seite 175.

363 Der große Ausreißer ist in Helsinki auf der Strecke nach Lathi zu finden, wo zwischen zwei Halten der Abstand 87 km beträgt. Trotz dieses im Stundentakt auftretenden Ausreißers liegt Helsinki im Median bei den Werten der anderen Netze, die einen Halteabstand zwischen 1,3 und 2,1 km aufweisen.

364 Ausnahme ist hier Caltrain mit 2,6 Minuten.

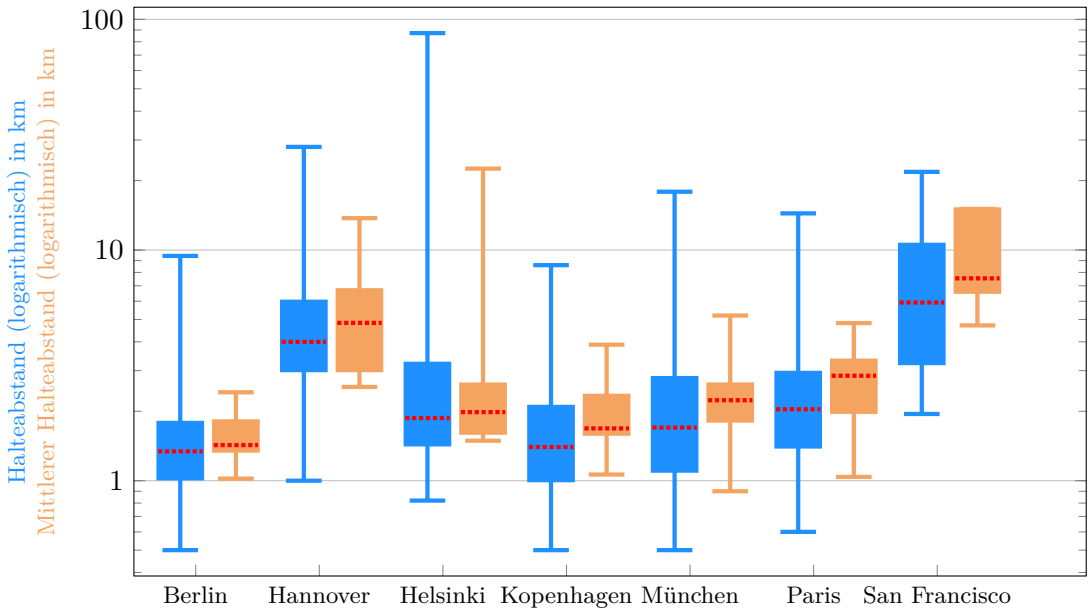

Abbildung 5.1.3: Halteabstand.

offensichtlich sowohl bei ausgelassenen Halten in zentrumsnahen Bereichen als auch auf Außenstrecken ergibt. Hintergrund ist, dass auf Außenstrecken zwar die Streckengeschwindigkeit höher und damit der Fahrzeitverlust zunächst größer ist, dafür jedoch die Fahrgastwechselzeit wegen eines in der Regel geringeren Reisendenaufkommens kürzer, was den effektiven Reisezeitverlust reduziert. In innenstadtnahen Bereichen ist die Haltezeit zum Fahrgastwechsel größer, die Streckenhöchstgeschwindigkeit jedoch in der Regel niedriger.[365] Heinrich (2014, S. 27ff.) hat auf Basis eines Ansatzes aus Blome (2007, S. 87) mit einer vereinfachten Fahrzeitrechnung für unterschiedliche Durchfahrgeschwindigkeiten die resultierenden Reisezeitverluste auf Basis der Kennwerte der Berliner S-Bahn-Fahrzeuge ermittelt. Seine Ergebnisse, die sich bei einer stets angenommenen Haltezeit von 30 Sekunden zwischen 47 und 81 Sekunden bewegen, sind kongruent zu den ermittelten Werten der erfassten Netze, die in Abbildung 5.1.2 dargestellt sind.

In Netzen mit ganztägigen Expressfahrten[366] werden diese als angebotsplanerisches Mittel eingesetzt - sei es zur Reisendenlenkung oder Reisezeitverkürzung (z. B. Helsinki, Kopenhagen und Paris). Netze mit (abschnittsweisen) Expressfahrten lediglich in der HVZ betreiben diese eher aus betrieblichen Gründen: Ein Grund ist die Infrastruktur, die wegen der Nutzung von Ferngleisen keine Zwischenhalte zulässt (z. B. Helsinki und München). Als zweiter Grund kann

[365] Vgl. zu Fahrgastwechselzeiten in Abhängigkeit der Zahl Ein- und Aussteiger Janssen u. Lehnhoff (2003, S. 13).

[366] Zu Expressfahrten siehe auch Analyse in der betrieblichen Betrachtung in Abschnitt 416 auf Seite 201.

die sicherungstechnische Ausstattung angeführt werden, die einen Zwischenhalt aus kapazitiven Gründen nicht erlaubt (z. B. München). Eine dritte Ursache sind die geringfügig kürzeren Fahrzeiten, die die Umlaufzeit und damit den Fahrzeugbedarf sowie die Personaleinsatzzeit reduzieren können (z. B. Paris).

Tabelle 5.1.1: Cluster zu Haltedifferenzierung und Reisezeitgewinnen.

	Cluster	Systeme
1	Kein Reisezeitgewinn / keine Differenzierung	S-Bahn Berlin
2	Kleine Differenzierung durch Auslassen von Halten und geringer relativer Reisezeitgewinn	*S-Bahn Hannover* *S-Tog Kopenhagen*
3	Starke Differenzierung durch Auslassen von Halten und großer relativer Reisezeitgewinn	S-Bahn München Caltrain San Francisco *RER Paris* *Nahverkehr Helsinki*

Es lassen sich die drei in Tabelle 5.1.1 dargestellten Gruppen bilden. In den kursiv dargestellten Netzen finden ganztägig Expressfahrten mit den genannten Differenzierungen statt, zum Teil mit abweichenden - jedoch in den Auswirkungen vergleichbaren - Haltemustern. In den übrigen Netzen wird nur in der HVZ differenziert.

Es bleibt ferner festzuhalten, dass das Auslassen eines Zwischenhaltes unabhängig von der Lage der Stationen näherungsweise rund eine Minute Reisezeitgewinn bringt - bei höherer Durchfahrgeschwindigkeit und kürzerer Haltezeit etwas mehr, bei langsamer Durchfahrgeschwindigkeit und längerer Haltezeit etwas weniger.[367]

Der in Abbildung 5.1.4 dargestellte Median der Reisezeiten liegt in allen Netzen außer San Francisco (34) im Bereich zwischen 15 und 22 Minuten. Die Abhängigkeit zur Ausdehnung des Netzes wird durch die Maximalwerte deutlich. Der Median der Reisezeiten über alle Verbindungen eines Netzes liegt abgesehen von San Francisco stets unter dem Median der kürzesten Reisezeiten. Dies zeigt, dass auf den Relationen mit kurzen Reisezeiten ein dichteres Angebot besteht - der Median folglich nach unten verändert wird - und die bei der Betrachtung der kürzesten Reisezeiten jeweils gleichstark gewichteten längeren Verbindungen seltener befahren werden. Lediglich in San Francisco, wo mit Ausnahme des südlichsten Abschnittes auf der Gesamtstrecke die gleiche Zahl an Fahrten stattfindet, ist der Median der kürzesten Reisezeiten kleiner als bei Betrachtung aller Verbindungen: Hier verlängern bei Betrachtung aller Fahrten notwendige Umstiege mit Wartezeiten die Reisezeit auf bestimmten Relationen.

[367] Für eine fundierte betriebliche Untersuchung wäre er detailliert auf Basis der jeweils örtlichen realen Gegebenheiten zu berechnen. Derart detaillierte Daten erfordern jedoch Zugang zu betrieblichen Unterlagen, die nicht in allen Netzen verfügbar waren.

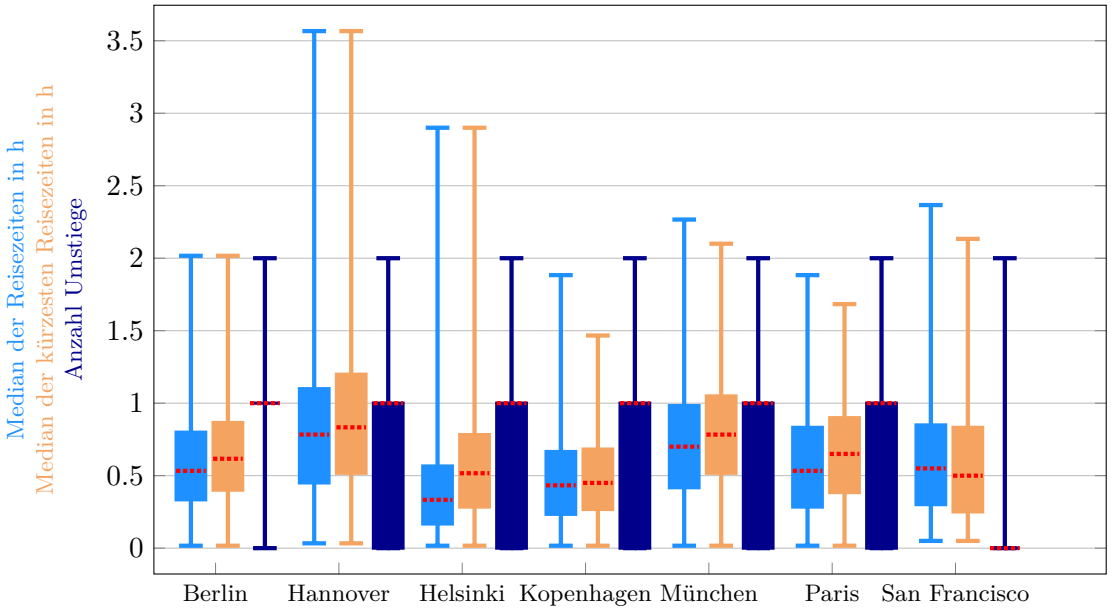

Abbildung 5.1.4: Median der Reisezeiten.

Verbindungen mit mehreren Umstiegen und jeweils kürzeren Wartezeiten werden negativer wahrgenommen als *stabile* Verbindungen mit wenigen Umstiegen und vergleichsweise längeren Wartezeiten.[368] Der mit den Festlegungen aus Abschnitt 3.2.1.5 ermittelte Fahrwiderstand L_i bewegt sich, wie in Tabelle 5.1.2 dargestellt ist, bei den betrachteten Netzen zwischen 0,15 und 24,31 EUR mit dem Median zwischen 2,48 und 5,42 EUR. In allen Netzen sind alle Relationen, die nur Fahrten in Lastrichtung nutzen, umsteigefrei oder weisen höchstens einen Umstieg auf. Häufigeres Umsteigen[369] ist nur auf Relationen notwendig, die Fahrten entgegen der Lastrichtung nutzen, beispielsweise weil sie über das Zentrum hinausführen. Die in Abbildung 5.1.5[370] dargestellten Werte der Wartezeiten und ihres Anteils an der Gesamtreisezeit lassen Rückschlüsse auf die Taktdichte zu: Das Maximum in Helsinki resultiert aus der geringen Anzahl an Fahrten auf einem Außenabschnitt. Die Maxima in Berlin, Hannover und München sind das Ergebnis ungünstiger Fahrplanlagen bei Übereck-Verkehren.[371] Der Median der Wartezeit in den einzelnen Netzen zeigt, wo ein überwiegend sehr dichtes Verkehrsangebot besteht, das zu sehr kurzen Wartezeiten von zwei bis drei Minuten auf der Mehrzahl der Relationen führt (Berlin, Helsinki, Kopenhagen und Paris). München liegt etwas darüber, was aus den 20-

[368] Vgl. detaillierte Erläuterung zum Fahrwiderstand in Abschnitt 3.2.1.5.
[369] Im Maximum sind es zwei Umstiege.
[370] Tabelle 5.1.2 zeigt neben dem Fahrwiderstand auch die Werte dieser Abbildung.
[371] Gemeint sind damit Relationen, die zunächst in Lastrichtung auf das Stadtzentrum führen und dann auf einer anderen Radialstrecke entgegen der Lastrichtung führen. Treffen hier zwei Linien aufeinander, können sich Umsteigezeiten von einer ganzen Taktlänge ergeben - in Hannover im ungünstigsten Fall 60 Minuten, in Berlin und München 20 Minuten.

Minuten-Takten auf den vergleichsweise vielen Außenstrecken resultiert. Im höchsten Bereich liegen Hannover und San Franciso - die beiden Netze mit dem geringsten Verkehrsangebot.

Tabelle 5.1.2: Zusammenfassung der Werte zu Umstiegen und Fahrwiderstand.

Netz	Wartezeit [Min.]			Anteil Wartezeit [%]			Fahrwiderstand (L_i) [EUR]		
	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Berlin	1,0	3,0	28,0	1,2	7,8	71,4	0,15	6,50	24,46
Hannover	1,0	8,0	54,0	0,6	14,9	83,1	0,31	9,44	48,00
Helsinki	1,0	3,0	58,0	1,0	9,7	52,0	0,15	5,57	42,73
Kopenhagen	1,0	2,5	8,0	1,5	10,7	64,3	0,15	4,95	14,86
München	1,0	5,0	20,0	0,9	10,3	66,7	0,15	8,52	24,77
Paris	1,0	2,0	14,0	1,0	4,8	69,2	0,15	6,50	17,34
San Francisco	1,0	6,0	6,0	2,1	11,0	31,6	0,46	4,80	19,82

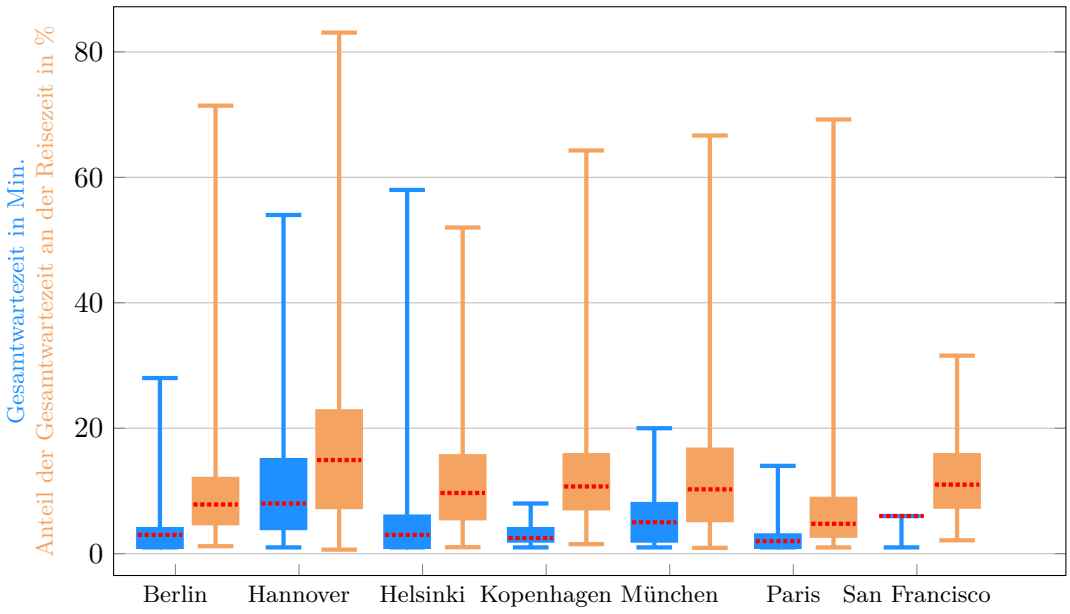

Abbildung 5.1.5: Gesamtwartezeit und ihr Anteil an der Gesamtreisezeit aller Relationen.

5.1.2. Verkehrliche Differenzierung

Zunächst erfolgt eine zusammenfassende Betrachtung der verkehrlichen Differenzierung, ausgedrückt durch das Platzangebot, die Verkehrsangebotsleistung, die Anzahl der Zugfahrten sowie die Stationshalte. Diese Quotienten sind in Abbildung 5.1.6, die die Veränderung jeweils zwischen HVZ und NVZ bezogen auf die Strecken bzw. die Stationen ausdrücken, zusammengefasst.

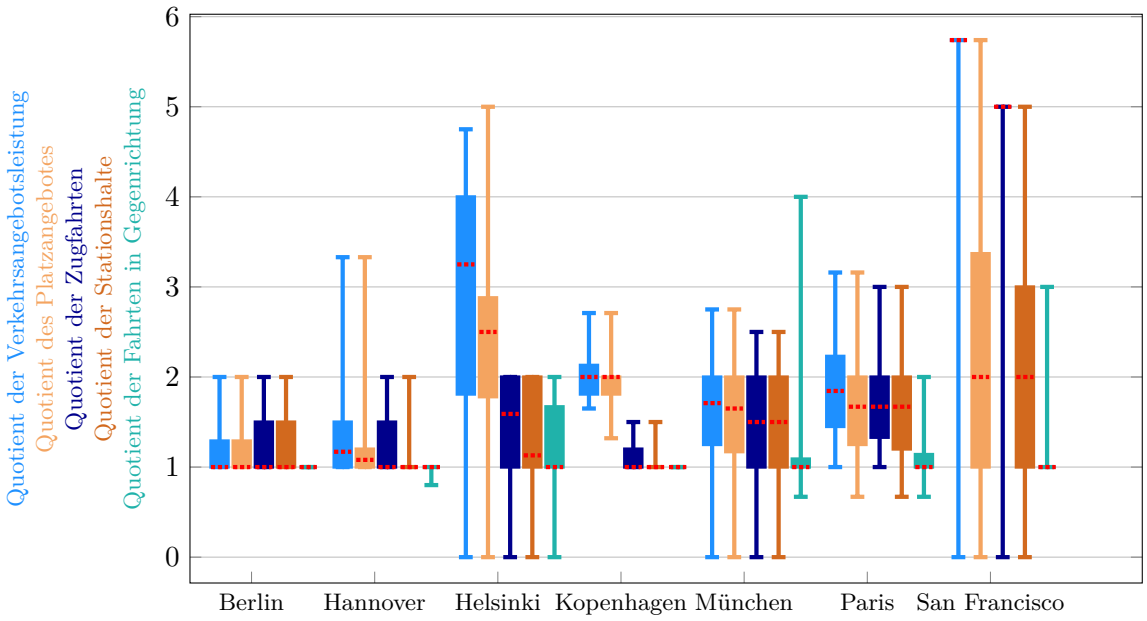

Abbildung 5.1.6: Zusammenfassung der Quotienten Platzangebot, Verkehrsangebotsleistung, Zugfahrten und Stationshalte.

Die deutschen Systeme haben gemein, dass das Verkehrsangebot bezogen auf die Anzahl der Zugfahrten und Stationshalte höchstens verdoppelt wird. Während der Median in Berlin verglichen mit dem restlichen Tagesverkehr keine Änderung auf der Mehrzahl der Linien zeigt, sind in München Steigerungen in diesen Dimensionen zu sehen, da die Verdichtungen einen Großteil der Linien betreffen. In Hannover gibt es mit der S5 zwischen Bad Pyrmont und Hameln einen Ausreißer, da hier in der HVZ neben dem sonst einteilig einmal pro Stunde verkehrenden Fahrzeug eine zweite stündliche Fahrt stattfindet, die in einer der Stunden als Dreifachtraktion geführt wird. Auf den übrigen Linien in Hannover gibt es einzelne Fahrten, die außerhalb der HVZ nur in Einfachtraktion gefahren werden, so dass der Median eine Erhöhung des Platzangebotes zeigt. In den Netzen von Helsinki, München und San Francisco gibt es Abschnitte, die nur in der HVZ befahren werden. Auf diesen ist das Minium entsprechend 0.

International fallen der Nahverkehr Helsinki und DSB S-tog in Kopenhagen heraus, die bezogen auf die Anzahl an Zugfahrten und die Halte an den Stationen vergleichbar mit den deutschen Systemen sind, jedoch das Angebot sehr deutlich auf allen Linien durch ein erhöhtes Platzangebot in längeren Zügen verdichten.[372]

Der Unterschied zwischen den Quotienten der Verkehrsangebotsleistung und des Platzangebotes zeigt, dass in allen Systemen außer Berlin (auch) mit Expresszügen verdichtet wird, da

[372] Auf einzelnen Abschnitten besteht das fünffache Platzangebot gegenüber der NVZ.

die Steigerung im Verkehrsangebot größer ist als im an den Halten zur Verfügung stehenden Platzangebot.

Die Betrachtung der absoluten Verkehrsangebotsleistung pro Stunde und Strecke in Abbildung 5.1.7 zeigt sehr deutlich das große Platzangebot in Kombination mit der dichten Zugfolge im Pariser Netz. In Kopenhagen ist im Bereich von 40 km erkennbar, dass eine verglichen mit den übrigen Netzen[373] etwas höhere Verkehrsangebotsleistung derart weit vom Zentrum vorhanden ist. In Helsinki gibt es eine Strecke, die sich von den übrigen Netzen abhebt: Dabei handelt es sich um den von sämtlichen betrachteten Fahrten befahrenen Abschnitt Pasila - Helsinki.[374]

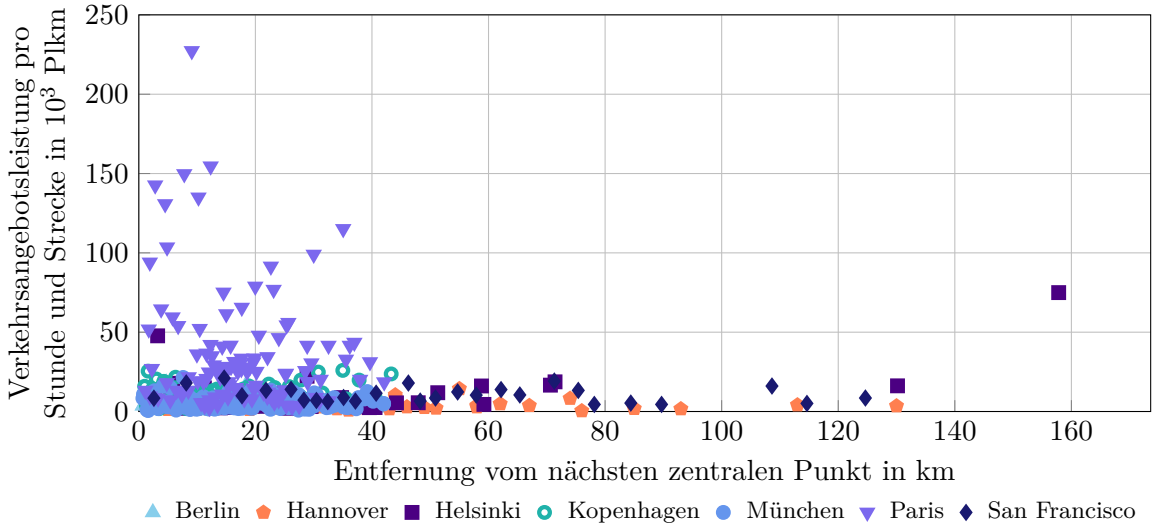

Abbildung 5.1.7: Verkehrsangebotsleistung pro Strecke in Abhängigkeit der Entfernung vom nächsten zentralen Punkt.

Der Quotient der Zugstärkenänderung ist in allen Netzen stets größer oder gleich eins. Eine Ausnahme ist in Berlin[375] zwischen HVZ und NVZ auf dem Abschnitt Bundesplatz - Südkreuz zu finden: Hier wird nur in der NVZ die mit vier Viertelzügen bediente S46 verlängert und ergänzt die mit Dreiviertelzügen verkehrende Ringbahn. In der HVZ wird der Takt durch die ebenfalls mit Dreiviertelzügen verkehrenden zusätzlichen Zuggruppen der Ringbahn verdichtet. In den Netzen in Helsinki, München und San Francisco zeigt der Quotient der Änderung der Zugstärke, dass es Abschnitte gibt, die ausschließlich in der HVZ bedient werden, weshalb dieser Quotient 0 ergibt.

[373] Abgesehen von Paris.

[374] Die zweite Ausnahme am rechten Rand von Abbildung 5.1.7 ist der Definition dieses Parameters geschuldet: Die Strecke Lahti - Mäntsälä ist mit 87 km sehr lang (vgl. Abbildung 5.1.3 auf Seite 178.) und erreicht trotz nur einer Fahrt pro Stunde in Verbindung mit der eingesetzten Doppeltraktion von Doppelstockfahrzeugen eine vergleichsweise hohe Verkehrsangebotsleistung.

[375] Vgl. Abbildung 5.2.16 auf Seite 206.

Tabelle 5.1.3 fasst die Netze in drei Clustern zusammen. Dabei erfolgt die Eingruppierung auf Basis des Median. Einzelne Ausreißer, wie zuvor dargestellt für Hannover, werden dabei vernachlässigt.

Tabelle 5.1.3: Cluster zur Differenzierung der Verdichtung des Platz- und Fahrtenangebotes.

	Cluster	Systeme
1	Keine bzw. kaum Differenzierung durch Erhöhung des Platz- und Fahrtenangebotes	S-Bahn Berlin
2	Differenzierung durch in der Regel gleichartige Erhöhung des Platz- und Fahrtenangebotes	S-Bahn Hannover S-Bahn München Caltrain San Francisco RER Paris
3	Starke Differenzierung durch unterschiedliche Erhöhung des Platz- und Fahrtenangebotes	DSB S-tog Kopenhagen Nahverkehr Helsinki

Bei der RER in Paris wird das Angebot ebenso gleichmäßig verdichtet wie in München - allerdings in stärkerem Maße. Bei genauer Betrachtung ist hier auch erkennbar, dass in Paris in der HVZ mit einer anderen differenzierten Haltbedienung gefahren wird als in den restlichen Zeiten, weshalb die Verdichtung in den Dimensionen der drei Quotienten nicht in gleichem Maße erfolgt.[376]

Caltrain in San Francisco sticht in allen drei Punkten heraus, indem dort das Angebot an Plätzen und Zugfahrten auf der gesamten Linie verfünffacht wird. Abgesehen von den Linienendpunkten ergibt sich jedoch an den Stationen mehrheitlich maximal nur eine Verdoppelung der Zughalte. Die Reisenden der Unterwegsbahnhöfe nehmen folglich anstelle einer Verfünffachung nur eine Verdoppelung des Verkehrsangebotes wahr. Dafür stehen ihnen jedoch bei unveränderter Zuglänge potenziell mehr Plätze zur Verfügung, weil der Zug auf der Gesamtstrecke seltener hält. Die Haltdifferenzierung verfolgt damit die in STIF (2012, S. 116ff.) beschriebene Zielstellung, im Zulauf auf das Hauptziel der meisten Reisenden - in diesem Fall dem Zentrum von San Francisco - eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Fahrgäste auf alle Züge zu erreichen.[377] Bemerkenswert ist jedoch auch, dass die von den *Baby Bullet Trains* bedienten zehn Stationen 83 Prozent aller Ein- und Aussteiger vereinen. Die rund 20 übrigen Stationen sind entsprechend wesentlich schwächer frequentiert.

In fast allen Systemen gibt es Stationen, die - wie zuvor für San Francisco beschrieben wurde - nicht oder nur in sehr geringem Umfang von der Angebotsverdichtung profitieren. In den meisten Netzen erfahren nur wenige Stationen eine (große) Verdichtung, andere behalten ein

[376] In Hannover, wo ebenfalls mit differenzierter Haltbedienung verdichtet wird, ist die Zahl der Verdichterfahrten zu gering, als dass die über alle Linien gebildeten Quotienten diese Änderung zeigen können.

[377] Vgl. dazu Abschnitt 3.2.1.3 auf Seite 23.

nahezu unverändertes Angebot.[378] Bemerkenswert ist in Paris, dass an drei Stationen der westlichen RER-Linie A das Angebot in der HVZ reduziert wird: Anstelle der Überlagerung der Fahrten von zwei Linienästen im 10- und 20-Minuten-Takt im Grundangebot, in dem jeweils alle neun Züge die drei Stationen bedienen,[379] werden beide Äste in der HVZ jeweils im glatten 10-Minuten-Takt befahren, die Züge halten jedoch alternierend. Somit ergibt sich ein Quotient der Stationshalte, der unter 1 liegt. Auch bei der S-Bahn München gibt es einen Quotient des Platzangebotes kleiner 1. Hier entsteht er durch eine größere Zugstärke in der NVZ, die durch den Entfall des Flügelns in Neufahrn auf der Linie S1 entsteht, weshalb die S1 bei einzelnen Fahrten in Doppeltraktion zwischen dem Flughafen und Neufahrn verkehrt.

Die Erhöhung der Fahrtenanzahl korrelliert oft mit dem Platzangebot, weil mit gleichartigen Fahrzeugformationen verdichtet wird. Die Berliner S-Bahn ist hier auf mehreren Linien eine Ausnahme: Hier sind die HVZ-Verstärkerzüge kürzer als die sogenannten Stammzüge.[380] Auch in Hannover wird teilweise mit kürzeren Zügen verstärkt, so dass auch hier trotz zusätzlicher Zugfahrten das Platzangebot nicht in dem gleichen Maß gesteigert wird.

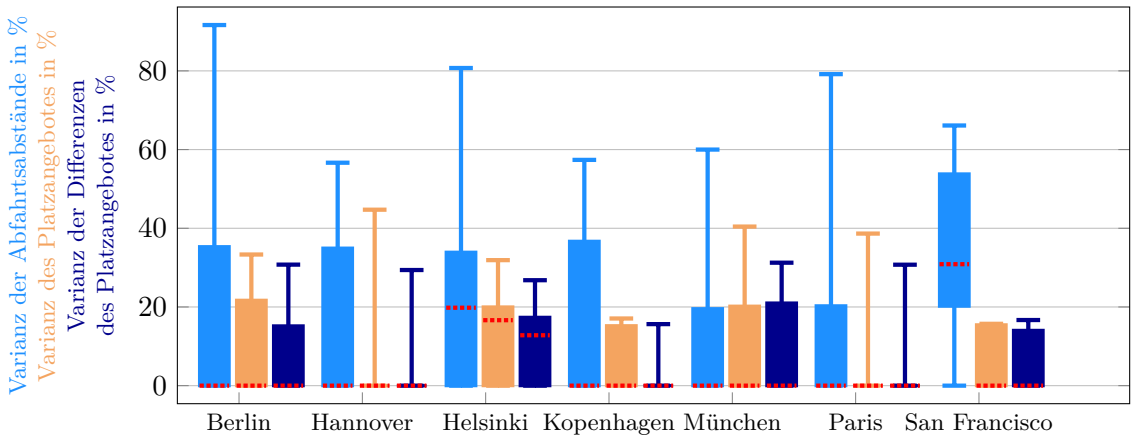

Abbildung 5.1.8: Vergleichsparameter zur Verteilung der Abfahrtsabstände und des Platzangebotes.

Die in den Abbildungen 5.1.8, 5.1.9 und 5.1.10 dargestellte Verteilung des Platzangebotes ist in allen Netzen sehr unterschiedlich und folgt zum Teil innerhalb eines Netzes in Abhängigkeit der Linie oder des Linienabschnittes unterschiedlichen Mustern. Klar erkennbar ist, dass

[378] Dies trifft insbesondere auf Stationen in den Außenbereichen kurz vor dem Linienende zu.

[379] Es handelt sich um die nordwestlichen Äste nach Poissy und Cergy-Pontoise der RER-Linie A und die Stationen Maisons-Lafitte, Sartrouville und Houilles-Carrières.

[380] In Abbildung 5.1.6 ist dies nicht erkennbar, da gemäß der Definition nur solche Züge als Verstärker gezählt werden, die ausschließlich in der HVZ verkehren. Die Tageszuggruppen in Berlin, auf denen ebenfalls oftmals kleinere Formationen im Einsatz sind als bei den Stammzügen, verkehren von 6 bis 21 Uhr und sind entsprechend im Sinne dieser Erhebung keine Verstärkerzüge. Somit liegt der Median auch für Berlin bei 0, da die Mehrzahl der Linien in diesem Sinne keine (zusätzliche) Verstärkung erfahren.

die Varianz mit der Entfernung von den zentralen Punkten abnimmt. Es entspricht der Erwartung, dass mit zunehmender Entfernung auch die Zahl der Zugfahrten und damit der sich überlagernden Linien geringer wird. In Hannover, Kopenhagen und Paris erfolgt die Verteilung des Platzangebotes weitgehend rhythmisch, so dass auf Abschnitten, auf denen Formationen unterschiedlicher Größe verkehren, sich dieses Muster in dem bei Walf (2008, S. 44ff.) beschriebenen Rhythmus wiederholt und der Median der Differenzen des Platzangebotes bei 0 liegt. In Hannover und Paris liegt überdies auch der Median der Varianzen des Platzangebotes bei 0, was durch weitgehend gleiche Formationen auf allen Fahrten eines Abschnittes erreicht wird.[381] Am stärksten differenziert ist das Angebot in Helsinki. Dort werden auf den Linien mitunter auf jeder Fahrt andere Fahrzeugkombinationen eingesetzt. Die S-Bahn München differenziert sehr stark über die Zugstärkenänderung - auch im Fahrtverlauf -, so dass sich auch hier eine ungleiche Verteilung des Platzangebotes auf den einzelnen Streckenabschnitten ergibt. Bei der S-Bahn Berlin resultiert die ungleiche Verteilung vor allem aus den Tages- und Verstärkerzuggruppen, die meist ein geringeres Platzangebot aufweisen als die Stammzüge. Es lassen sich bei der Verteilung des Platzangebotes folglich die drei in Tabelle 5.1.4 dargestellten Cluster bilden. Auffällig ist, dass die beiden Netze Hannover und Paris, die sich im ersten Cluster befinden, - neben München - die größte absolute Varianz des Platzangebotes aufweisen, ansonsten jedoch durch den sehr strikten Rhythmus im Median gleichförmig sind. Berlin und München landen gemeinsam im mittleren Cluster, wenngleich sie vergleichbare Werte durch unterschiedliche Maßnahmen erreichen: In Berlin gibt es mehrheitlich im Gegensatz zu den anderen Netzen nur zaghafte Verstärker, die entweder auf einzelne Züge oder kurze Abschnitte beschränkt sind und weitgehend mit kürzeren Zügen durchgeführt werden. In München wird das Angebot hingegen auf vielen Abschnitten verdoppelt - jedoch mit überwiegend denselben Formationen wie in der NVZ.

Die in Abbildung 5.1.8 gezeigte Verteilung der Zugfahrten zeigt ein ebenfalls differenziertes Bild: Abgesehen von Helsinki (33% Varianz) und San Francisco (31%) liegt in allen Netzen der Median bei 0, wodurch an mindestens der Hälfte der Stationen eine gleichmäßige Verteilung der Abfahrten ausgedrückt wird. Wenngleich es in allen Systemen Stationen mit Abweichungen von über 55% in den Abständen zwischen zwei Abfahrten gibt, teilen sich die vorgestellten sieben Systeme bei Betrachtung der oberen Quartil grob in drei Bereiche: Im unteren Bereich liegt Paris mit weniger als 20% Varianz, dem mittleren Bereich mit 30 bis 35% Varianz gehören die Systeme in Berlin, Hannover, Kopenhagen und München an. Mit einer Varianz des oberen Quartils von über 40% liegen Helsinki und San Francisco im oberen Bereich. Diese Einord-

[381] In Hannover gibt es einzelne Fahrten - drei Prozent der Gesamtzahl in der HVZ - in Dreifachtraktion. Alle anderen Fahrten werden in Doppeltraktion gefahren. Ferner hat Hannover auf dem Abschnitt Bad Pyrmont - Hameln den Einzelfall, dass eine Fahrt als Dreifachtraktion zwischen zwei Einfachtraktionen verkehrt, wodurch die beiden über 40 Prozent liegenden Varianzwerte begründet sind.

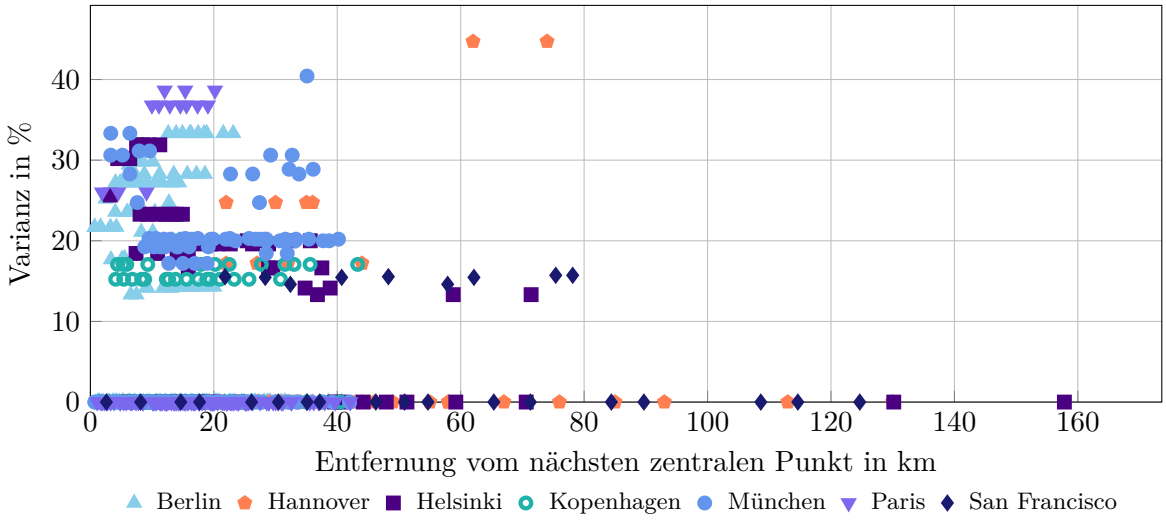

Abbildung 5.1.9: Varianz des Platzangebotes in der HVZ in Bezug auf die Lage der Strecken im Netz.

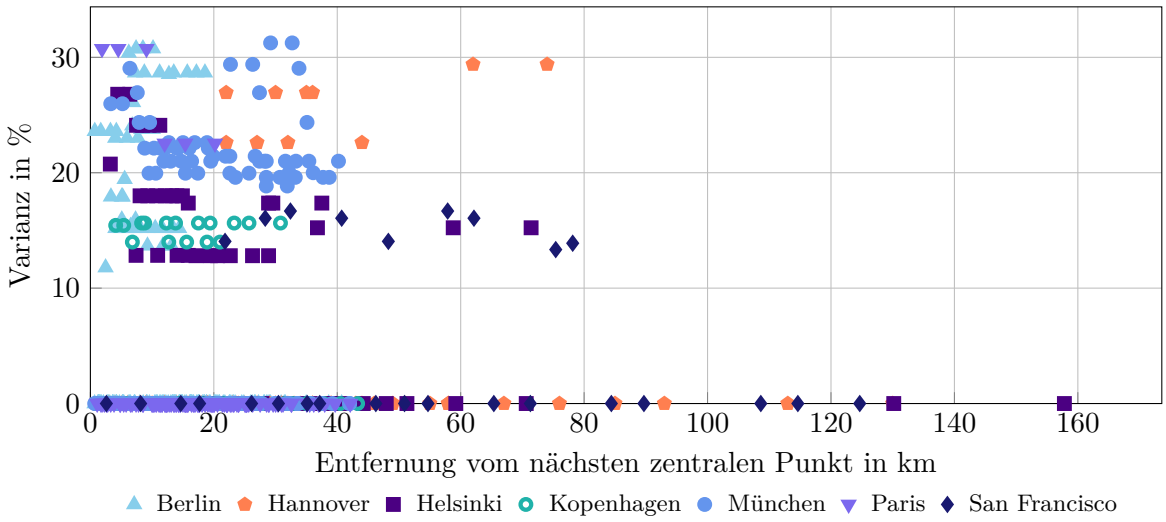

Abbildung 5.1.10: Varianz des Deltas des Platzangebotes in der HVZ in Bezug auf die Lage der Strecken im Netz.

Tabelle 5.1.4: Cluster zur Verteilung des Platzangebotes.

	Cluster	Systeme
1	Ähnliches Platzangebot auf allen Fahrten einer Strecke, zum Teil sogar netzweit	S-Bahn Hannover RER Paris
2	Mittlere Differenzierung v.a. durch abweichende Zugbildung bei Verstärkerzügen	S-Bahn Berlin S-Bahn München Caltrain San Francisco DSB S-tog Kopenhagen
3	Starke Differenzierung auf allen Fahrten durch unterschiedliche Fahrzeugtypen oder Zugstärken	Nahverkehr Helsinki

nung überrascht im vergleichsweise unrhythmischen Caltrain-System wenig. In Hannover liegt die Ursache in den abschnittsweise als Express geführten Verstärkerlinien, die das sonst sehr regelmäßige Fahrtengefüge im 30- bzw. 60-Minuten-Takt stören. In Kopenhagen zeigt sich die Überlagerung von zwei Linien auf den meisten Außenästen, von denen eine als Expresszug und eine mit Halt an allen Stationen verkehrt. Abgesehen von den nur von einer Linie bedienten Stationen sowie dem Bereich der Stammstrecke resultiert daraus die ungleichmäßige Verteilung der Zugfahrten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in den Netzen mit eher dünnem Verkehrsangebot[382] eher keine Veränderungen in Platzangebot, Anzahl an Zugfahrten und Stationshalten zu beobachten sind, wohingegen in den Netzen mit sehr dichtem Angebot deutlich stärker differenziert wird. Ausreißer ist hier das Berliner S-Bahn-Netz, in dem trotz dichter Verkehre wenig differenziert wird.[380] Auch Caltrain ist eine Ausnahme, passt jedoch auch in weiteren Aspekten nicht in das Raster der anderen Systeme.

5.1.3. Exkurs: Fahrgastinformation

Bei der Analyse der beschriebenen Systeme wurden auch Erkenntnisse zur Fahrgastinformation gesammelt, die nachfolgend zur Ergänzung dargestellt werden.

Alternierende Bedienung von Zwischenhalten kann für Reisende in schwächer nachgefragten Relationen zusätzliche Umsteigezwänge[383] generieren. Dies läuft der Bestrebung der Reisenden, die eine möglichst stressfreie, komfortable und einfache Fahrt im öffentlichen Ver-

[382] Gemeint sind Netze mit 20- bis 30-Minuten-Zugfolge als Grundangebot auf den einzelnen (Außen-)Ästen.
[383] Zu deren eigener Bedeutung vgl. Abschnitt 3.2.1.7 auf Seite 36.

kehr haben möchten,[384] zuwider. Ferner erhöht sich die Komplexität und damit die von Dicke-Ogenia u. Dziekan (2010, S. 80) beschriebene *Unsicherheit*[385].

Allerdings ist es durch heutige Informationssysteme möglich, den zusätzlichen *Stress* für die Reisenden zu mildern und die Barrieren des Umsteigezwangs zu reduzieren. Anwendungen auf Smartphones und mobilen Websites, die den Reisenden auf seiner Reise begleiten und fortwährend mit auf ihn zugeschnittenen Informationen versorgen, sind längst keine Vision mehr, sondern Realität.[386]

In den vorgestellten Netzen mit (abschnittsweisen) Expressfahrten müssen daher die Fahrgäste mit den notwendigen Informationen versorgt werden, denen sie entnehmen können, mit welcher Fahrt sie das gewünschte Ziel erreichen.

Dass dies prinzipiell auch ohne heute selbstverständliche individuelle Fahrgastinformation mit einfachen Mitteln möglich ist, zeigt das in Abbildung 5.1.11 dargestellte dynamische Fahrgastinformation im Pariser RER-Netz,[387] bei der sämtliche Stationen entlang der Linie[388] in einer Liste angezeigt werden. Vom nächsten Zug bediente Stationen sind durch Leuchtpunkte oder farbige Markierungen dynamisch hervorgehoben. Für Pendler tragen alle Züge einen vierstelligen Buchstaben-Code,[389] aus dem der Endbahnhof sowie das Bedienschema der Zwischenstationen hervorgeht. (Dupin u. a. 2007, S. 168f.) Pendler können sich entsprechend den Blick auf die Stationsliste sparen. Ein ähnliches Prinzip findet in einfacherer Form im Großraum Helsinki Anwendung.[390] Dort werden die Fahrten mit einzelnen Buchstaben bezeichnet, aus welchen sich Endstation und bediente Zwischenhalte schließen lassen. Noch simpler erfolgt die Information bei Caltrain San Francisco: Dort fordert der Betreiber die Fahrgäste auf seiner Website auf, der Fahrplantabelle die Zugnummer der gewünschten Fahrt zu entnehmen und diese mit der an der Zugspitze anzeigten Zugnummer zu vergleichen.[391] In Deutschland wird auf dynamischen Anzeigern mit durchlaufenden Texten auf ausgelassene Halte hingewiesen.

[384] Vgl. u. a. Dziekan u. Kottenhoff (2007, S. 492).
[385] Im englischen Originaltext als *uncertainty* bezeichnet.
[386] Vgl. u. a. Dettenbach (2013, S. 24),
[387] Mittlerweile gibt es diese Darstellungen auch auf großen zeitgemäßeren Displays mit weniger statischen Elementen, wenngleich die Funktionalität gleich geblieben ist. Detaillierte Ausführungen zu diesem System siehe Kapitel 4.6 auf Seite 146.
[388] In Richtung auf das Stadtzentrum werden nur die Stationen bis zum Ende der Innenstadt genannt.
[389] Der nächste Zug in Abbildung 5.1.11 trägt den Code *PAPO* und hat den Bahnhof Saint-Rémy-lès-Chevreuse als Ziel.
[390] Vgl. Ausführungen dazu in Kapitel 4.3 auf Seite 105.
[391] Caltrain Rider Information: *„Find a timetable . . . Which direction are you going? Northbound or Southbound? . . . Determine the Stations where you will be departing and arriving. . . . On the timetable, locate the times that correspond to the stations, and note the train number listed at the top of the column. . . .“* (Quelle: http://www.caltrain.com/riderinfo/howtoride.html, Zugriff: 20. Dezember 2016.)

Abbildung 5.1.11: Stationenliste auf der Pariser RER-Linie B mit Markierung der vom nächsten Zug bedienten Stationen [eigene Aufnahme, 25. Februar 2015].

Während früher die Routensuche im öffentlichen Verkehr manuell durchgeführt wurde - im Fernverkehr vor allem mit Hilfe von Kursbuchtabellen und im städtischen Nahverkehr primär durch Liniennetzpläne -, haben heute elektronische Fahrplanauskunftssysteme die größte Bedeutung bei der Bereitstellung von Informationen zu Wegeketten im öffentlichen Verkehr, so dass die Anzeigen an Fahrzeugen und Bahnsteigen nicht mehr die alleinigen Informationsquellen sind.[392]

5.2. Betriebliche Klassifizierung

Die betriebliche Klassifizierung betrachtet die in den drei Gruppen *Belastung*, *Infrastruktur* und *Komplexität* zusammengefassten Vergleichskriterien.

5.2.1. Infrastruktur

Die zur Verfügung stehende Infrastruktur wird über die Anzahl an Gleisen, die Ausdehnung der Netze, die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten und die vorhandende Zugbeeinflussung analysiert.

Weitgehend können die Züge in den betrachteten Netzen zweigleisige Strecken nutzen.[393] In den meisten Netzen gibt es Außenäste mit eingleisigen Abschnitten. In München sind dies derart viele, dass das untere Quartil diese umfasst. Das RER-Netz in Paris und das Netz von DSB S-tog in Kopenhagen bestehen ausschließlich aus zweigleisigen Abschnitten.[394] In Paris stehen auf einigen Abschnitten sogar zwei weitere (Fern-)Gleise zur Verfügung, an denen es meist auch Bahnsteige an allen Zwischenhalten gibt, so dass sie (nicht nur) im Störungsfall ebenfalls genutzt werden können. In Helsinki stehen ebenfalls auf einigen Abschnitten zwei weitere Gleise zur Verfügung. Diese dienen jedoch primär dem Fern- und Güterverkehr und weisen an den von diesen Zügen nicht bedienten Stationen meist auch keine Bahnsteige auf. Eine Nutzung im Störungsfall ist folglich nur unter Auslassung von Zwischenhalten möglich.

[392] Vgl. u. a. Dziekan (2008a, S. 15f.), Wegner (2012, S. 51f.) und Müer (2011). Im Bereich der Lenkung der Nachfrage ist jedoch auch das Verhalten von regelmäßig eine Strecke nutzenden Reisenden zu beachten: Diese fahren - unabhängig von Algorithmen der Fahrplanauskunftssysteme und entsprechendes Wissen aus Erfahrung vorausgesetzt - oftmals bis zu einem späteren Bahnhof vor, wenn sie dort gegebenenfalls einen früheren Zug zum Ziel erreichen (könnten) als den Direktzug ab ihrer Starthaltestelle. Vgl. dazu auch Dilba u. Künzel (2011, S. 35).

[393] Siehe Abbildung 5.2.1.

[394] Die einzigen Eingleisigkeiten im Sinne der Erfassung sind Einfahrten in jeweils einen Endbahnhof, wo beide Richtungen über wenige Meter dasselbe Gleis benutzen und keine parallelen Fahrmöglichkeiten bestehen.

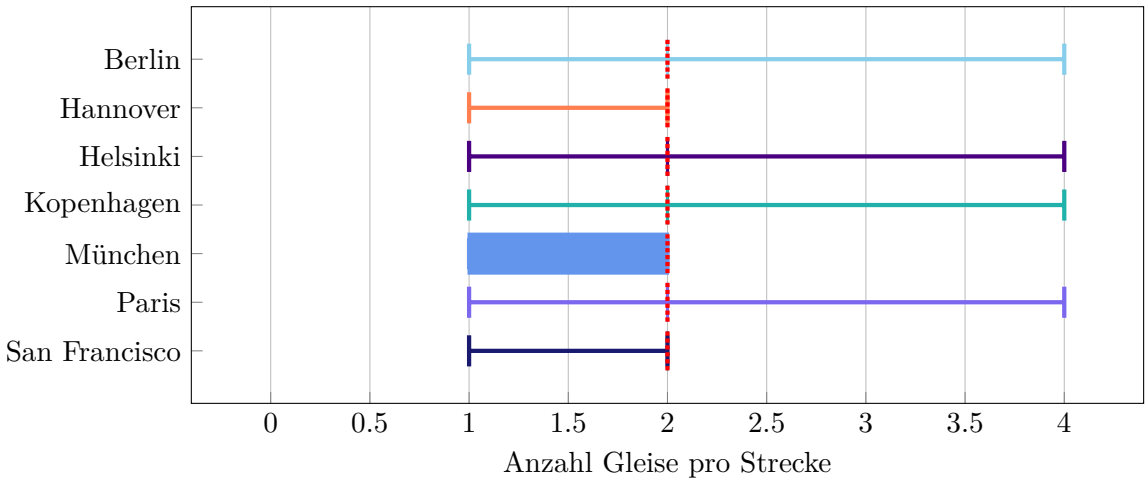

Abbildung 5.2.1: Anzahl Gleise pro Strecke.

Abgesehen von Caltrain in San Francisco weisen alle Systeme eine oder mehrere Stammstrecken auf und erfüllen damit das in Abbildung 5.2.2 dargestellte Schema von Delvendahl (1964, S. 698). Die Netze in Berlin und Paris weisen in diesem Sinne mehrere Stammstrecken auf. Das Netz in Helsinki hat eine sehr kurze Stammstrecke, die in einem Kopfbahnhof endet.

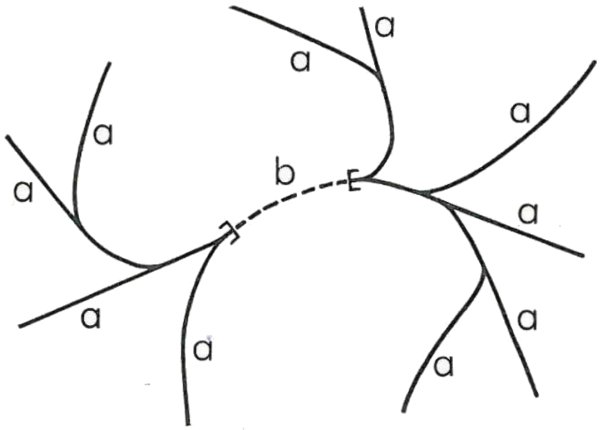

Abbildung 5.2.2: Schema eines Nahverkehrsnetzes mit Vorortstrecken (a) und Verbindungsbahn bzw. Stammstrecke (b) (Delvendahl 1964, Bild 1, S. 698).

Die in Abbildung 5.2.3 in der rechten Säule dargestellte Distanz der Endstellen von den zentralen Punkten zeigt die große Spannweite der Netze. Die klassischen Schnellbahnnetze von Berlin, Kopenhagen, München und Paris haben eine maximale Ausdehnung von rund 40 km. Die kürzesten Äste liegen in diesen Netzen jeweils 10 bis 14 km von den zentralen Punkten entfernt. Die Netze in Hannover und Helsinki können auf den Ästen, in denen die jeweils maximale

Entfernung zu finden ist,[395] gemäß der eingangs zitierten Definition des Nahverkehrs[396] nicht als solcher gezählt werden. Dennoch gehören auch diese Linien sowohl betrieblich als auch im Marketing zu den jeweiligen Schnellbahnnetzen. Auf beiden sehr langen Linien in Hannover und Helsinki verkehren ganztägig ausschließlich Expresszüge, die in den zentrumsnahen Bereichen, wo sie von anderen kürzeren Linien überlagert werden, mehrere Stationen ohne Halt durchfahren. Der Median der Netzausdehnung liegt in allen Netzen in einem großen Bereich zwischen 23 und 125 km.[397]

Abbildung 5.2.3 zeigt die (durchschnittlichen) zulässigen Höchstgeschwindigkeiten der einzelnen Systeme sowie die Reisegeschwindigkeit der betreffenden Netze im Vergleich. Es ist nicht zu verallgemeinern, dass in Netzen mit größerer Ausdehnung grundsätzlich mit höheren Höchstgeschwindigkeiten gefahren wird. DSB S-tog in Kopenhagen und das RER-Netz in Paris mit einer Ausdehnung von jeweils rund 40 km haben Abschnitte, die mit 120 km/h befahren werden dürfen. Bei etwa gleicher Netzausdehnung darf in Berlin mit maximal 100 km/h gefahren werden.[398] Die Caltrain-Strecke ist mit fast 125 km vergleichsweise lang, begrenzt die Höchstgeschwindigkeit jedoch derzeit auf 128 km/h, was neben trassierungstechnischen Gründen vor allem durch die fehlende Zugbeeinflussung[399] begründet ist. In Helsinki und München gibt es Strecken am Rand der Netze, die mit noch größeren Geschwindigkeiten befahren werden dürfen - in beiden Netzen handelt es sich dabei um Mischverkehrsstrecken mit höherwertigen Zügen.

Die ebenfalls in Abbildung 5.2.3 dargestellte zulässige Geschwindigkeit bei planmäßigen Durchfahrten an Bahnsteigen mit einer Bandbreite zwischen 60 km/h und 200 km/h wurde bereits zuvor in der verkehrlichen Betrachtung behandelt, da sie vor allem Auswirkungen auf die Reisezeitgewinne hat.[400]

Abgesehen von Caltrain, das bislang die in den USA übliche Ausrüstung mit ortsfester Signalisierung ohne jegliche Zugbeeinflussung hat und erst in den kommenden Jahren mit einer solchen ausgestattet werden muss, haben alle betrachteten Systeme Zugbeeinflussungssysteme.[401] Die Breite der derzeit vorhandenen technischen Lösungen wird dabei ausgeschöpft - vom mechanischen Streckenanschlag, den es noch einige Jahre lang bei der S-Bahn Berlin geben wird, bis zu den kontinuierlich wirkenden Systemen in München, Kopenhagen und auf der RER-Linie A in Paris. Ein Zusammenhang zwischen dem Zugbeeinflussungssystem und dem Verkehrsangebot lässt sich insofern aufzeigen, als dass in den Systemen mit der abschnittsweise

395 Die Reisezeiten sind entsprechend der Distanzen lang.
396 Vgl. Kapitel 15 auf Seite 9.
397 Am geringsten ist der Median der Ausdehnung mit 23 km in Berlin, am größten in Helsinki (101 km) und bei Caltrain San Francisco mit 125 km. Alle anderen Netze liegen zwischen 31 und 58 km.
398 Seit Jahren ist die Geschwindigkeit fahrzeugbedingt sogar noch weiter herabgesetzt.
399 Vgl. Abschnitt 400.
400 Siehe Abschnitt 358 auf Seite 176.
401 Siehe Tabelle 5.2.1 auf der nächsten Seite.

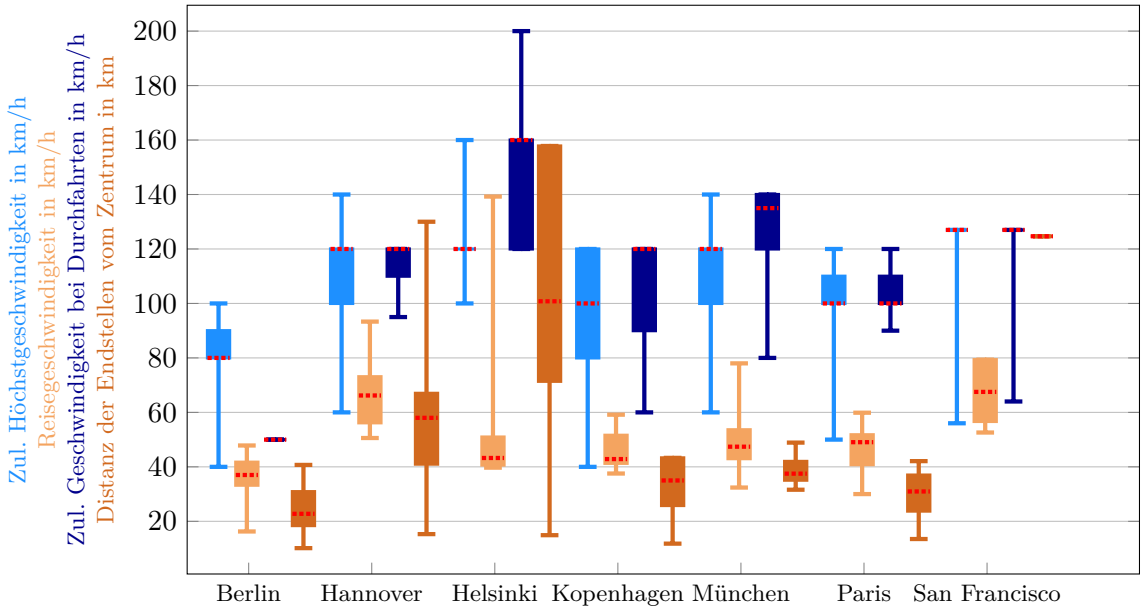

Abbildung 5.2.3: Zusammenfassung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten und der Reisegeschwindigkeit.

höchsten Anzahl an Zugfahrten pro Gleis[402] in diesen Bereichen ein kontinuierlich wirkendes Zugbeeinflussungssystem vorhanden ist. Die zweite Gruppe, zu der die Berliner S-Bahn (24 Fahrten), Helsinki (19 Fahrten) sowie die RER-Linie B (20 Fahrten) in Paris zählen, beinhaltet nur Systeme mit punktförmigen Zugbeeinflussungssystemen, in Berlin sogar zum Teil noch ohne Beeinflussung am Vorsignal. Caltrain als einziges System ohne Zugbeeinflussung weist auch das geringste Verkehrsangebot auf.

Tabelle 5.2.1: Zugbeeinflussungssysteme in den betrachteten Netzen.

Netz	KmF	KoF	PmVF	PmV	PoV	NoS	Beschreibung
Berlin			X		X		1010
Hannover				X			100
Helsinki			X				1000
Kopenhagen	X	X					110000
München	X			X			100100
Paris	X			X			100100
San Francisco						X	1

[402] Vgl. dazu Abbildung 5.2.5 auf Seite 196.

5.2.2. Belastung

In dieser Gruppe sind alle Kriterien zusammengefasst, über die Belastung der betrachteten Systeme ausgedrückt wird. Darunter fallen einerseits die absoluten Zugzahlen sowie deren Verdichtung und andererseits die Länge der HVZ, die Auskunft darüber gibt, über einen wie langen Zeitraum der verdichtete Betrieb durchgeführt wird.

Die betrachteten Netze haben sehr unterschiedlich dichte Verkehrsangebote und Streckenauslastungen. Die geringste Zuganzahl in der HVZ in Lastrichtung ist bei Caltrain sowie bei der S-Bahn Hannover mit sechs bzw. sieben Fahrten pro Stunde und Richtung auf dem am dichtesten befahrenen Abschnitt zu finden, wie Abbildung 5.2.4 zeigt. Der Anteil der Streckenabschnitte mit sehr hoher Zugzahl variiert in den einzelnen Netzen.[403] Während dies in Kalifornien die gesamte Strecke ist, beträgt die Länge des meist befahrenen Abschnittes in Hannover nur wenige Kilometer.[404] Die größte Anzahl an Zügen pro Gleis gibt es auf den Stammstrecken der RER A in Paris, der S-Bahn München sowie DSB S-tog Kopenhagen mit jeweils 30 Fahrten in Lastrichtung pro Stunde in der HVZ. In allen Fällen werden auf den am dichtesten befahrenen Abschnitten keine Zwischenhalte ausgelassen und alle Züge halten an allen Stationen. Differenziert wird nur außerhalb dieser Strecken. In den Netzen von Berlin, Kopenhagen und Paris liegt der Median der Anzahl an Zugfahrten pro Stunde und Richtung bei rund zehn Zugfahrten.[405] Damit liegen diese drei Netze deutlich über den Netzen von Helsinki und München, die ähnliche Maximalwerte aufweisen, jedoch diese hohen Zahlen nur in einem kleinen Teil des Netzes haben.

Nur in Berlin und Helsinki gibt es in den dicht befahrenen Bereichen mehr als zwei Streckengleise und eine dadurch höhere Anzahl an Zugfahrten pro Richtung als pro Richtung und Gleis. In München gibt es im dicht befahrenen Bereich des Hauptbahnhofes ebenfalls mehr als die zwei Gleise der S-Bahn-Stammstrecke - jedoch handelt es sich betrieblich um zwei getrennte Betriebsstellen.[406]

Neben der zuvor behandelten maximalen Belastung durch die reine Anzahl an Zugfahrten ist auch die Verdichtung durch zusätzliche Zugfahrten von Bedeutung: Systeme mit ganztägig gleicher Belastung sind anders zu bewerten als solche mit nur zeitweiser hoher Streckenbelastung. Der Quotient der Zugfahrten η_F[407] zeigt, inwieweit die Verdichtung nur einzelne, in der Regel zentrale Streckenabschnitte oder weite Teile der Netze betrifft. Abbildung 5.2.6 zeigt die Werte

[403] Siehe Abbildung 5.2.5 auf der nächsten Seite.
[404] Es handelt sich um den Bereich rings um Hannover Hbf.
[405] In Paris liegt das obere Quartil bei 18 Fahrten. Hier gibt es mehrere Strecken im Bereich von 20 bis 40 km Entfernung vom Zentrum, auf denen mehr als zehn Fahrten pro Richtung in der HVZ stattfinden.
[406] Die S-Bahnstation in München Hbf liegt im Tunnel, der eigentliche Hauptbahnhof ist oberirdisch.
[407] Vgl. Definition in Abschnitt 3.2.2.5 auf Seite 42.

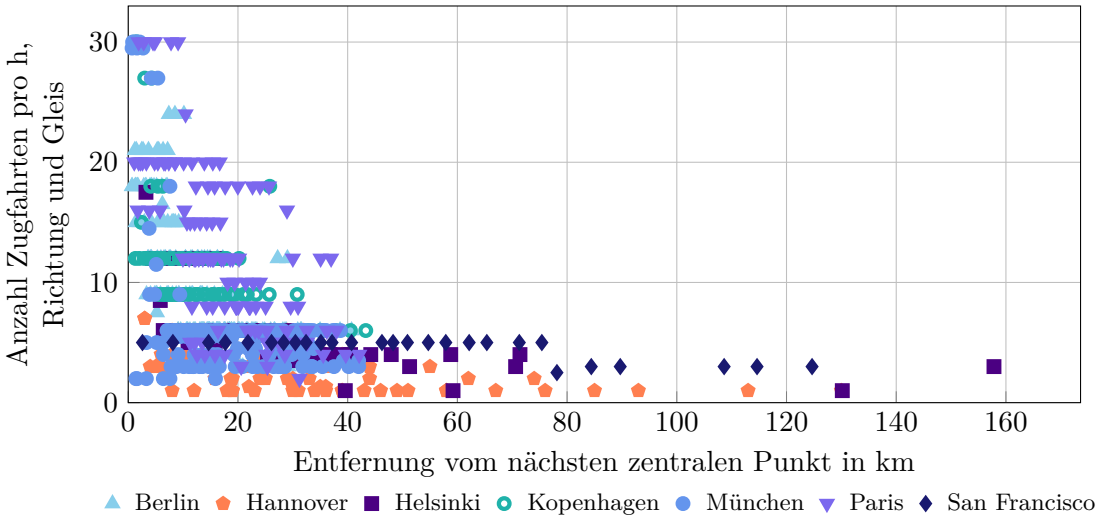

Abbildung 5.2.4: Anzahl an Zugfahrten pro Richtung in der HVZ in Bezug auf die Lage der Strecken im Netz.

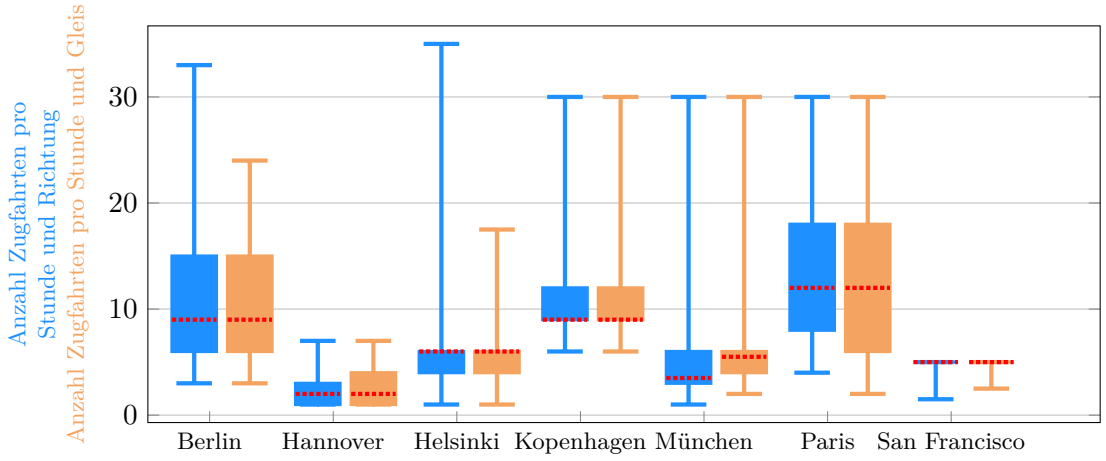

Abbildung 5.2.5: Maximale Anzahl an Zugfahrten pro Stunde und Richtung bzw. Gleis.

der einzelnen Netze. Diese teilen sich in die zwei in Tabelle 5.2.2 dargestellten Cluster. In Paris und München gibt es Abschnitte, auf denen in der HVZ eine mehr als doppelt so große Anzahl an Zugfahrten pro Stunde und Richtung stattfinden als in der NVZ. In Paris zeigt selbst das untere Quartil eine größere Zahl an Zugfahrten als in der NVZ: Hier wird somit nahezu auf allen Strecken das Fahrtenangebot verdichtet. Caltrain mit fünf anstelle einer Fahrt pro Stunde übertrumpft die anderen Netze deutlich, allerdings nur im Quotienten, da der absolute Werte niedriger ist als in den anderen Netzen.

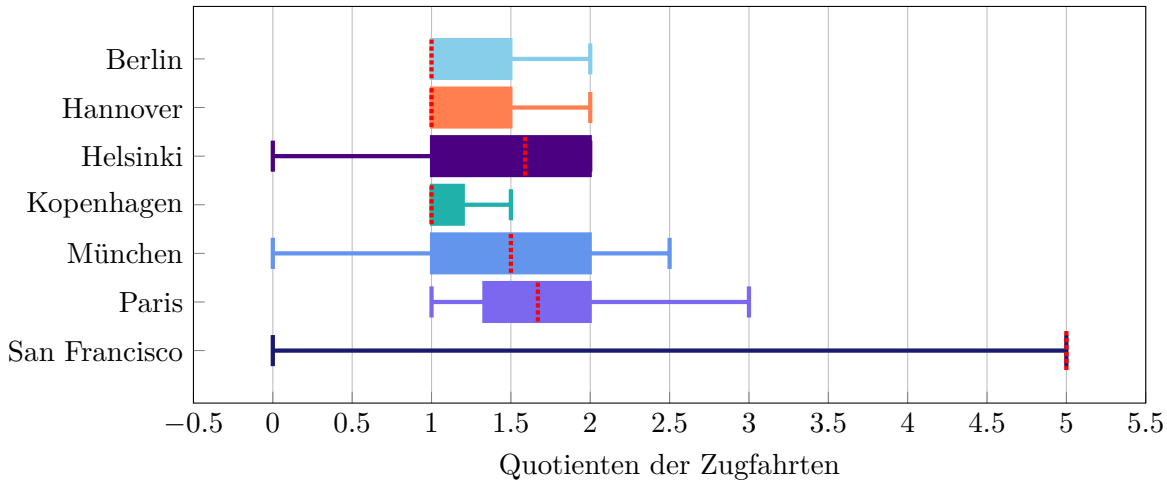

Abbildung 5.2.6: Quotienten der Zugfahrten der einzelnen Netze.

Tabelle 5.2.2: Cluster zum Quotienten der Anzahl Zugfahrten.

	Cluster	Systeme
1	Mehrheitlich keine Verdichtung	S-Bahn Berlin S-Bahn Hannover DSB S-tog Kopenhagen
2	Verdichtung auf der Mehrheit der Strecken	Nahverkehr Helsinki S-Bahn München RER Paris Caltrain San Francisco

Die Ausdehnung der HVZ bestätigt in den meisten Netzen den bei Weidmann (2013b, S. 120) genannten Erfahrungswert von zwei Stunden.[408] Nur in Berlin und Hannover ist die morgendliche Angebotsspitze länger: In Berlin liegt die Dauer zwischen zweieinviertel und vier Stunden. Die größte Ausdehnung gibt es auf der die Innenstadt umrundenden Ringbahn, die unter anderem eine Verteilfunktion zwischen den Radialen hat. Deren Fünf-Minuten-Takt am

[408] Siehe Abbildung 5.2.7.

Morgen wurde in den letzten Jahren verlängert.[409] In Hannover ist die größere Länge auf die langlaufenden Verstärkerfahrten zurückzuführen.

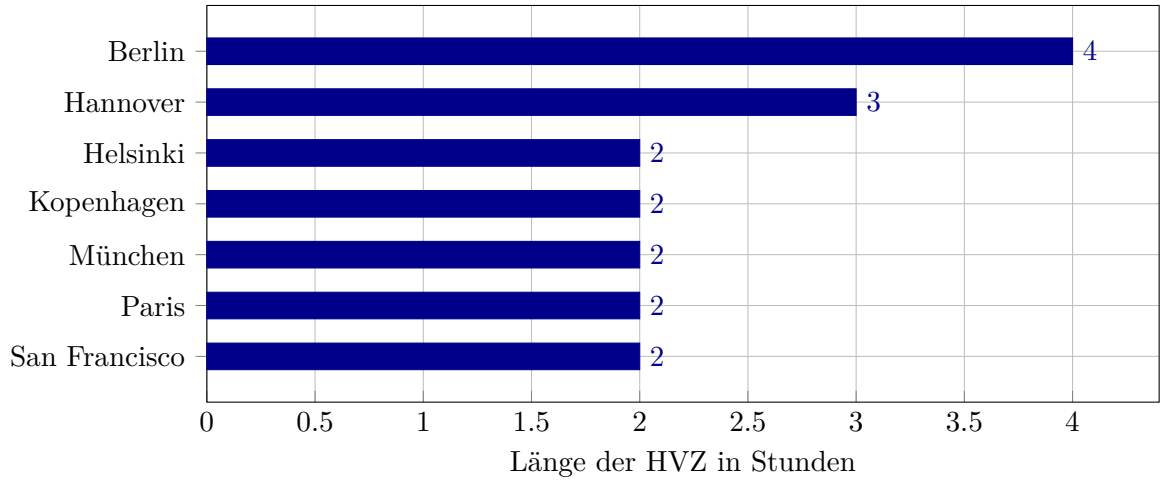

Abbildung 5.2.7: Länge der HVZ.

5.2.3. Komplexität

Die Komplexität drückt aus, wie differenziert die Systeme betrieben werden. Darunter fallen einerseits die Endstellen, die Betriebsdurchführung entgegen der Lastrichtung, die Veränderung der Zugstärke sowie insbesondere der detailliertere Vergleich der im Fokus stehenden Expressfahrten.

Zwischenendstellen gibt es in manchen Netzen auch auf den Strecken mit der dichtesten Zugfolge: Bei der Berliner S-Bahn enden am Beginn bzw. Ende aller drei sehr stark befahrenen Abschnitte Züge.[410] In Kopenhagen endet die einzige echte Verstärkerlinie auf der Stammstrecke am Bahnhof Østerport.[411] In München ist der Ostbahnhof am Ende der Stammstrecke für die S1 auch in der HVZ der Endbahnhof. In Helsinki bildet der Hauptbahnhof, ein Kopfbahnhof, den Endbahnhof sämtlicher Züge.[412]

[409] Ein weiterer Grund ist nach Beobachtung des Autors auch 25 Jahre nach der Wiedervereinigung in den unterschiedlichen Gewohnheiten in Ost- und Westteil der Stadt zu finden: Die Zeit der größten Nachfrage in den östlichen Stadtbezirken liegt etwa eine Stunde vor jener in den westlichen Bezirken. Dies belegende Zahlen waren mit vertretbarem Aufwand nicht zugänglich.

[410] Es handelt sich um die Bahnhöfe Hermannstraße, Ostbahnhof, Warschauer Straße und Potsdamer Platz. Am Bahnhof Hermannstraße enden die Züge auf den durchgehenden Hauptgleisen und wenden über eine Abstellanlage. An den drei anderen Bahnhöfen gibt es pro Richtung jeweils zwei Bahnsteigkanten.

[411] Sie nutzt dafür ein eigenes Bahnsteiggleis.

[412] Es gibt im direkten Vorfeld dieses Bahnhofs keinerlei Überwerfungsbauwerke, so dass die ein- und ausfahrenden Züge in den drei Teilen des Bahnhofs Fahrstraßenkonflikten ausgesetzt sind.

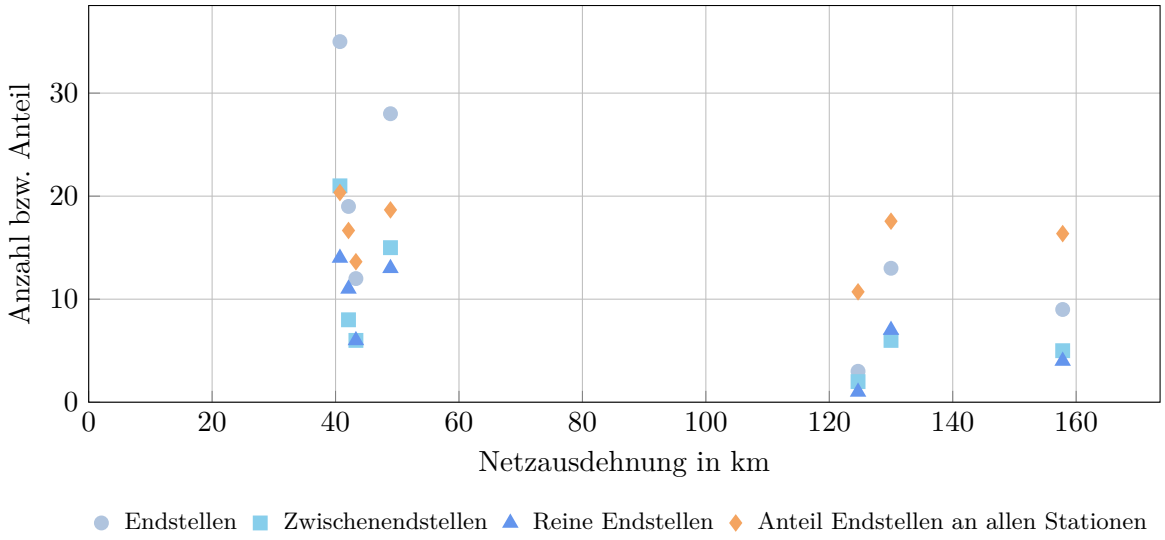

Abbildung 5.2.8: Gesamtzahl der Endstellen und Zwischenendstellen bzw. Anteil der Endstellen an allen Stationen im Verhältnis zu der Netzausdehnung.

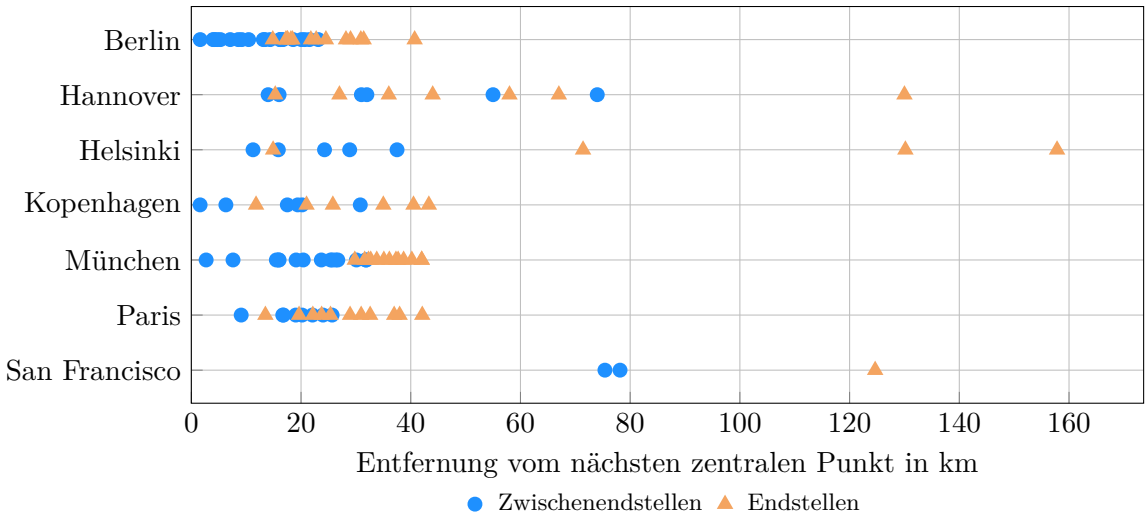

Abbildung 5.2.9: Entfernung der Endstellen und Zwischenendstellen in den Netzen von den definierten zentralen Punkten.

Ein direkter Zusammenhang zwischen der bereits in Abschnitt 394 behandelten Ausdehnung des Netzes und der Anzahl an Endstellen sowie dem Anteil an Zwischenendstellen ist in Abbildungen 5.2.8 und 5.2.9 nicht erkennbar. Helsinki kommt mit einer maximalen Distanz vom Zentrum von 158 km auf lediglich neun Endbahnhöfe mit einem Anteil von 56% Zwischenendstellen, das kleinere Berliner Netz mit maximal 41 km Ausdehnung weist 35 Endbahnhöfe und nahezu denselben Anteil an Zwischenendstellen auf. In Kopenhagen und München ist der Anteil der Zwischenendstellen ähnlich, wobei bei annähernd gleicher Netzausdehnung die absolute Zahl der Endstellen in Kopenhagen (12), München (28) und Paris (19) weit auseinander liegt. Über alle Netze betrachtet beträgt der Anteil an Zwischenendstellen zwischen 42,11 und 66,67%.

Der Anteil der Endstellen an der Gesamtzahl der Stationen liegt in den Netzen zwischen 14% in Kopenhagen und 20% in Berlin. Damit liegen die Netze relativ eng beeinander. Die S-Bahn Berlin ist mit jeder fünften Station als Endbahnhof ein Ausreißer nach oben. Der einzelne Korridor in San Francisco liegt unter allen anderen Netzen mit einem Anteil von lediglich 10%.[413]

Die Endstellen befinden sich in allen Netzen entweder an Punkten mit Brüchen in der Nachfrage oder kurz dahinter.[414] Bei Caltrain liegt der Anteil an Zwischenendstellen mit 67% etwas höher, da mit Gilroy und Tamien in der HVZ die Strecke über den eigentlichen Endpunkt San Jose Diridon hinaus verlängert wird und es somit neben dem einen regulären südlichen Endbahnhof, der damit zur Zwischenendstellen degradiert wird, zwei weitere gibt. Weitere Endbahnhöfe gibt es bei Caltrain nicht, da einerseits San Francisco als Endbahnhof die mit Abstand bedeutendste Station und andererseits die Auslastung im Linienverlauf relativ gleichmäßig ist.[415]

Die Anzahl an Endstellen und der Anteil an Zwischenendstellen sind folglich weniger abhängig von der Netzausdehnung als vielmehr von der Siedlungsstruktur und der Bevölkerungsverteilung des Raumes, die beeinflussen, wie stark sich ein Netz verästeln muss und an wie vielen Stellen aufgrund von Nachfragebrüchen Züge zur Anpassung auf die Nachfrage enden sollten.

Die Varianz der Fahrtlängen[416] bietet einen anderen Blick auf die Verteilung der Endstellen und Zwischenendstellen und die Netzgestaltung. Hohe Werte in diesem Parameter resultieren

[413] Vgl. Abbildung 5.2.8.

[414] Vgl. auch diesbezügliche genauere Betrachtung der deutschen S-Bahn-Netze bei Walf (2008, S. 109ff.).

[415] Nach o.A. (2014b, S. 5) beträgt die Fahrgastzahl in San Francisco das Doppelte der am zweit häufigsten genutzten Station Palo Alto. o.A. (2014b, Table 4, S. 5) zeigt die Einsteigerzahlen der *„Top 10 Stationen“* in Bezug auf die Nachfrage. Diese sind relativ gleichmäßig auf der Gesamtstrecke verteilt. Die in o.A. (2014b, S. 6) genannte durchschnittliche Reiseweite von umgerechnet etwa 36,4 km entspricht knapp einem Drittel der Gesamtstrecke und entspricht damit in etwa der durchschnittlichen Fahrtlänge der übrigen betrachteten Netze.

[416] Vgl. Abbildung 5.2.10 auf der nächsten Seite.

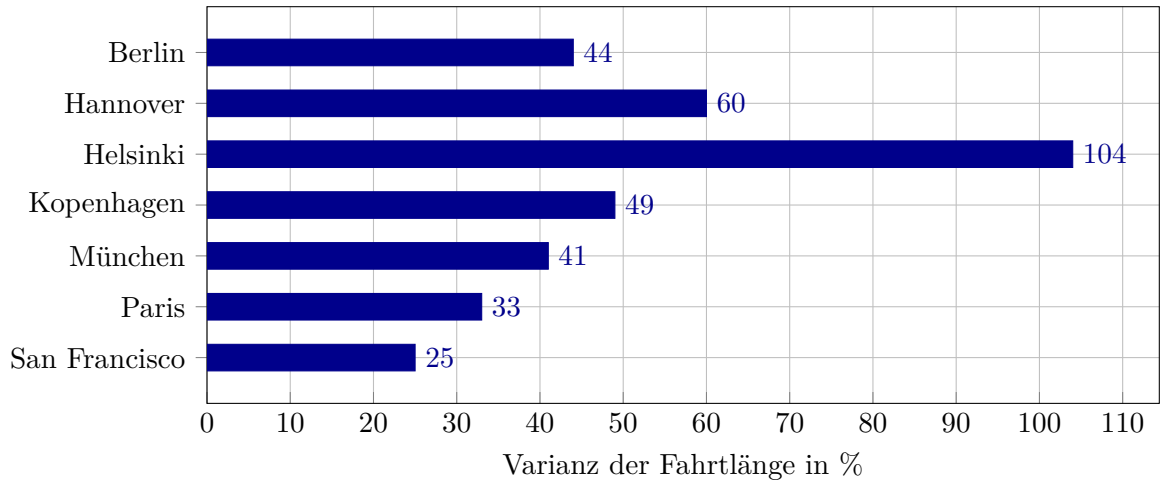

Abbildung 5.2.10: Varianz der Fahrtlänge.

aus einer bei zunehmender Entfernung vom Zentrum nachlassenden Verkehrsbedienung. Niedrige Werte wie in San Francisco (24,5%) zeigen jedoch auch, dass der Umkehrschluss nicht zulässig ist. In den klassischen Schnellbahnnetzen in Berlin, Kopenhagen, München und Paris liegt dieser Wert im Bereich zwischen 32 und 49%. Er resultiert überwiegend aus einer Zwischenendstelle zwischen dem Zentrum und dem Streckenendbahnhof, so dass sich eher kurze und eher lange Fahrten abwechseln und sich im Gleichgewicht befinden. Größere Varianzen gibt es in Hannover, wo sich die sehr langen Fahrten der Linie S5 nach Paderborn gegenüber den restlichen relativ homogenen Fahrtlängen bemerkbar macht. Der Spitzenwert ist in Finnland zu finden, wo die sehr kurzen Fahrten im engeren Verdichtungsraum um Helsinki sehr langen Fahrten nach Lahti und Karjaa gegenüber stehen, so dass eine Varianz von 104% entsteht.

Der Anteil der Expressfahrten an der Gesamtzahl aller Zugfahrten in Lastrichtung variiert sehr stark zwischen den beschriebenen Systemen, wie Abbildung 5.2.11 für die HVZ zeigt: In Berlin gibt es keine Expressfahrten, in München lassen lediglich $7,3\%$ der Fahrten Zwischenhalte aus. In Hannover, Helsinki und Kopenhagen sind gut ein Drittel[417] der Fahrten abschnittsweise Expressfahrten. In Paris ($69,8\%$) und San Francisco (100%) wird dieses Prinzip am stärksten angewendet. Es lassen sich die drei Gruppen in Tabelle 5.2.3 bilden. Betrachtet man die Verteilung der Expressfahrten auf die einzelnen Strecken, wie sie in Abbildung 5.2.12 dargestellt ist, zeigt sich, dass zwar abgesehen von dem betrachteten Korridor in San Francisco der Median des Anteils der Expresszüge pro Strecke in allen Netzen bei null liegt. Allerdings gibt es in den drei Netzen mit ganztägigen Expresszügen in Helsinki, Kopenhagen und Paris viele Stationen, an denen bis zu 33 (Kopenhagen) bzw. 50% (Paris) der Fahrten durchfahren.[418]

[417] Es sind in Hannover $34,6\%$, in Helsinki $32,9\%$ und in Kopenhagen $30,43\%$.

[418] Die in Abbildung 5.2.12 dargestellten Maximalwerte von 100% in Hannover, Helsinki und Paris sind der Definition dieses Wertes geschuldet. In allen drei Netzen gibt es zusammenlaufende bzw. parallel verlaufende

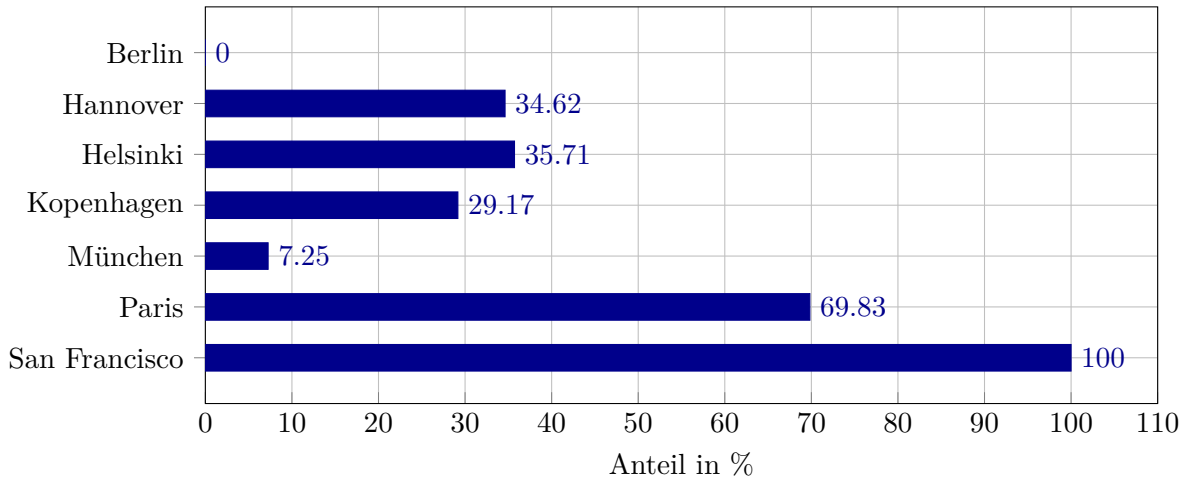

Abbildung 5.2.11: Anteil der Expresszüge.

Tabelle 5.2.3: Cluster zu dem Anteil an Expressfahrten im Gesamtnetz.

Gruppe	Beschreibung
Keine oder kaum Expresszüge	In Berlin gibt es gar keine Expressfahrten und in München lassen nur weniger als zehn Prozent aller Fahrten einen oder mehrere Zwischenhalte aus. Expresszüge sind in diesen Netzen nicht existent bzw. lediglich eine Randerscheinung.
Rund ein Drittel Expresszüge	Zu dieser Gruppe gehören die Netze in Hannover, Helsinki und Kopenhagen. Der Einsatz von Expresszügen ist hier fester Bestandteil des Angebots- und Betriebskonzeptes.
Überwiegend Expresszüge	In Paris (75%) und San Francisco (100%) lässt der überwiegende Teil der Fahrten in der HVZ Zwischenhalte aus. Der Einsatz von Expresszügen dominiert hier das Angebots- und Betriebskonzept.

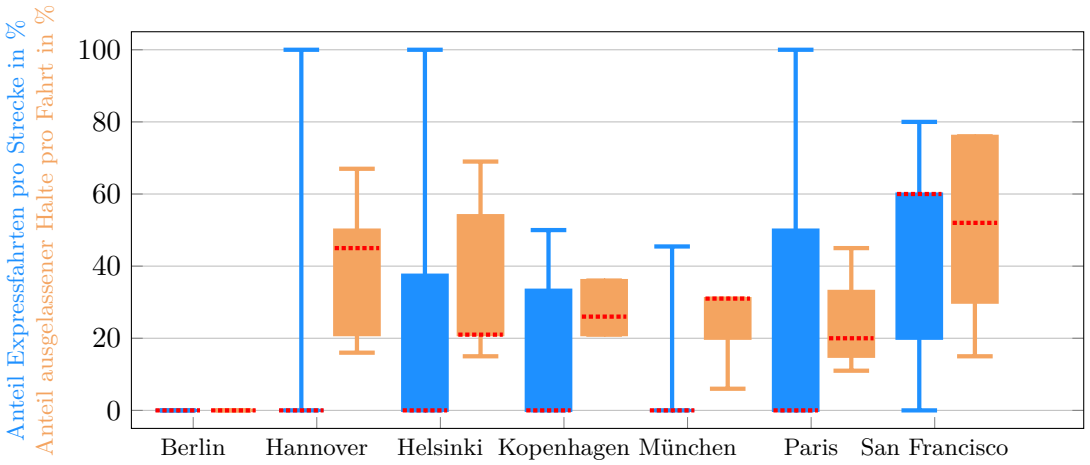

Abbildung 5.2.12: Anteil Expressfahrten pro Strecke sowie Anteil ausgelassener Halte pro Fahrt.

Das Verhältnis der Durchfahrten[419] in Bezug zur Entfernung zum nächstgelegenen zentralen Punkt zeigt über alle Netze, dass es eine Reihe von Stationen im zentrumsnahen Bereich gibt, an denen mehr als die Hälfte der Züge nicht halten.[420] Abbildung 5.2.14 unterstreicht dies: In den äußeren Netzbereichen, in denen die Anzahl an Zugfahrten stets geringer ist, halten in allen Netzen stets alle Züge.

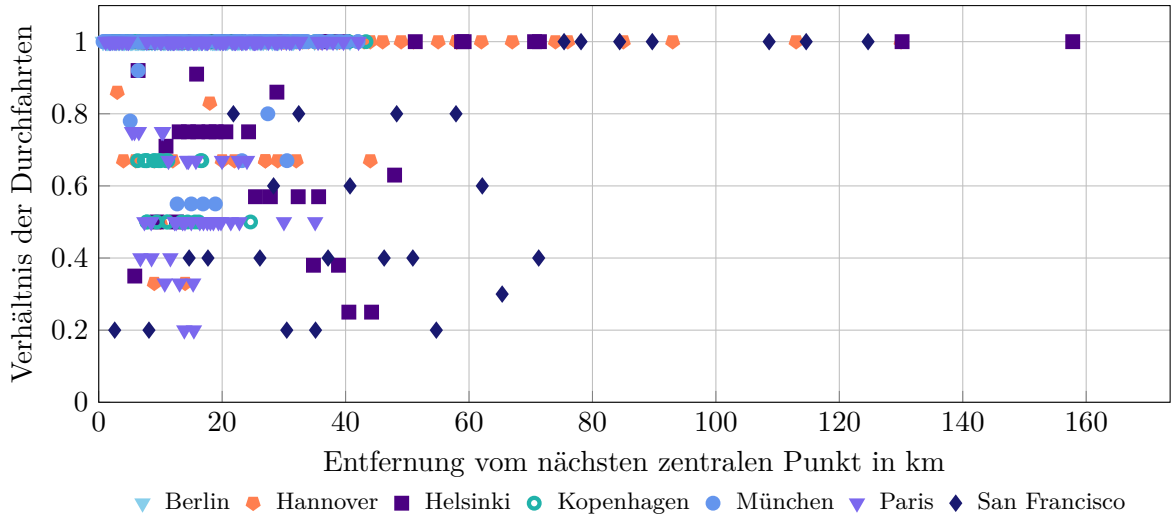

Abbildung 5.2.13: Anteil haltender Züge pro Station in Bezug auf die Lage der Stationen im Netz.

Der in Abbildung 5.2.12 in der jeweils zweiten Säule gezeigte Anteil durchfahrener Stationen pro Fahrt zeigt zwei Gruppen. Mangels Expressfahrten bleibt Berlin außen vor.

- In den Netzen von Helsinki, Kopenhagen und Paris beträgt der Anteil im Median jeweils rund 20 Prozent. Die Fahrten bedienen (im Median) auf weiten Teilen ihres Verlaufs alle Stationen.

- In Hannover und San Francisco liegt der Anteil im Median bei rund 50 Prozent. Die dort stattfindenden einige Halte auslassenden Fahrten haben somit überwiegend den Charakter echter Expressfahrten.

Strecken, auf denen ausschließlich Züge verkehren, die an der Station am Ende der Strecke nicht halten. In Hannover betrifft dies die Verbindungskurve zwischen Aligse und Ahlten. In Helsinki sind dies die parallel verlaufenden Ferngleise und in Paris ist es die Strecke von Achères-Ville nach Maisons-Lafitte, da der Bahnhof Maisons-Lafitte in der HVZ nur von Zügen des anderen kurz vor dem Bahnhof zusammenlaufenden Streckenast aus Richtung Achères Grand Cormier bedient wird.

419 Vgl. auch Ausführungen zu diesem Kriterium in der wirtschaftlichen Klassifizierung in Abschnitt 437 auf Seite 209.

420 Siehe Abbildung 5.2.13 im linken unteren Bereich: Hier findet man zahlreiche Stationen mit einem Anteil haltender Züge pro Station von 0,5 oder weniger im Bereich von rund 10 km Entfernung von dem nächsten zentralen Punkt.

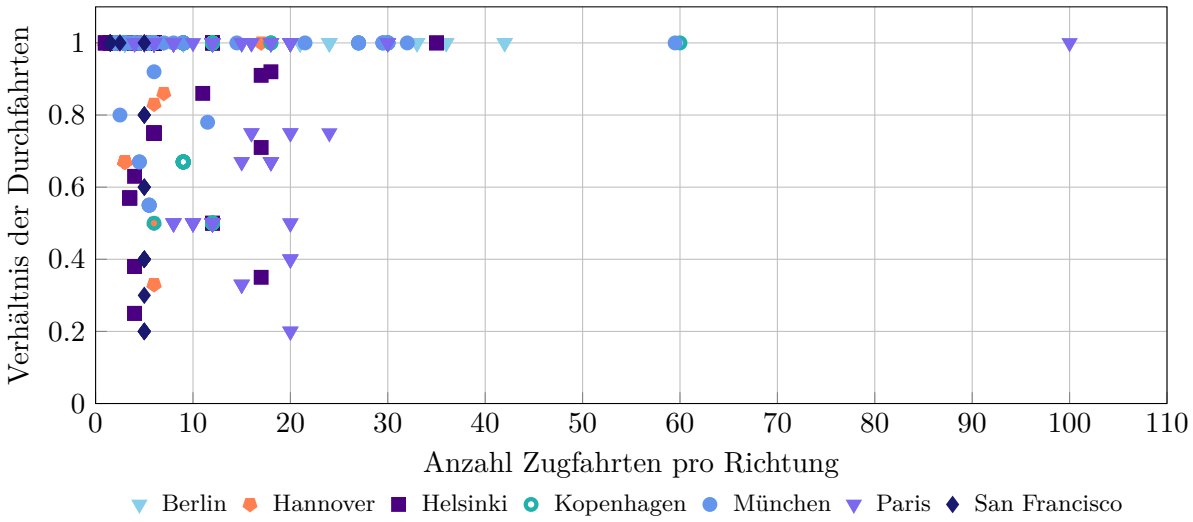

Abbildung 5.2.14: Anteil haltender Züge pro Station in Bezug auf die Anzahl an Zugfahrten pro Richtung.

Das absolute Maximum in direkter Folge ausgelassener Halte findet sich mit neun in Helsinki, betrifft dort jedoch nur drei Fahrten in der HVZ.[421] Aus diesen Werten lässt sich nicht eindeutig ablesen, ob in einem Netz eher *skip-stop* oder *zonal service* zur Anwendung kommt. Dies ist einerseits darin begründet, dass es kein Netz gibt, das ausschließlich das eine oder das andere Prinzip anwendet. Ferner ist der Abstand der bedeutenden Zwischenhalte,[422] an denen auch Expresszüge halten, zu beachten. Diese beeinflussen die maximal in direkter Folge ohne Halt durchfahrenen Stationen.[423]

Die S-Bahnen Hannover und München sind die einzigen beiden Systeme, die innerhalb der HVZ die Zuglänge im Reiseverlauf variieren.[424] In beiden Netzen betrifft dies nur einen kleinen Teil der Fahrten. In absoluten Zahlen ergeben sich im dicht befahrenen Münchener Netz jedoch innerhalb der beiden Spitzenstunden bei etwa 110 Fahrten auf den Hauptlinien rund 20 Kupplungs-/Trennvorgänge. Hier wird auf einzelnen Abschnitten in der HVZ mit der dreifachen Zuglänge gegenüber dem Tagesverkehr gefahren. Die Zugstärke wird sogar während der HVZ bis zu zweimal im Fahrtverlauf geändert. Auf der Münchener S1 wird ganztägig geflügelt, sodass sich hier bei nahezu allen Zügen die Zugstärke im Fahrtverlauf ändert.[425] Bei der S-

[421] Siehe Abbildung 5.2.15 auf der nächsten Seite.
[422] Dies sind beispielsweise Zwischenendstellen oder wichtige Umsteigeknoten.
[423] In Paris läge außerhalb der HVZ der maximale Wert wie in Helsinki bei neun. Auf der RER-Linie B verkehren diese Expresszüge außerhalb derHVZ jedoch alle 15 Minuten und nicht nur als *Exoten* auf einem schwach befahrenen Streckenast.
[424] Vgl. 5.2.16 auf Seite 206.
[425] Es handelt sich um die Flügelung in Neufahrn zum Flughafen und nach Freising.

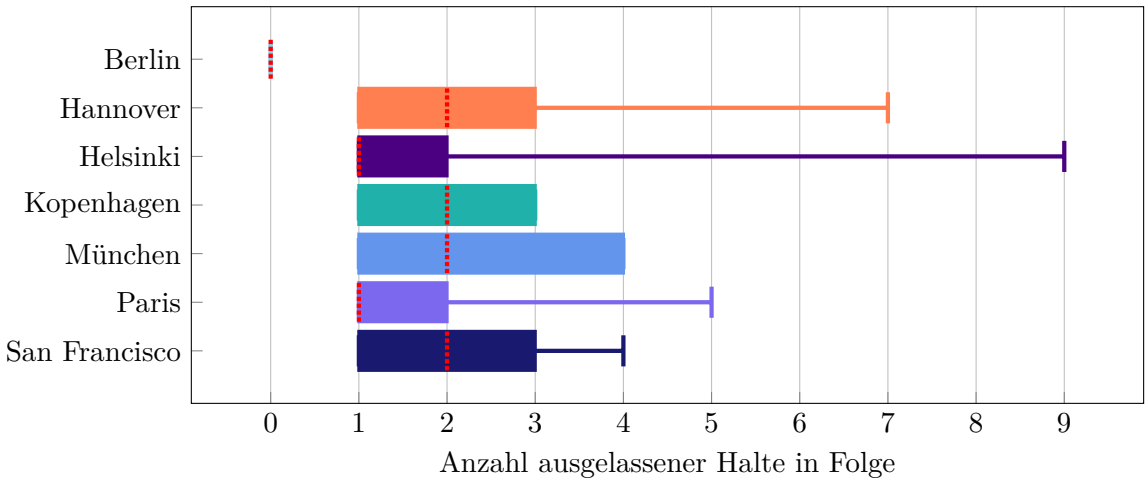

Abbildung 5.2.15: Ausgelassene Halte in Folge.

Bahn Hannover gibt es bei der ganztägig in Hameln gestärkte/geschwächte S5 eine Änderung im Zugverlauf.[426] In den anderen betrachteten Netzen finden abgesehen von einzelnen Zügen in Tagesrandlage keine Zuglängenänderungen im Fahrtverlauf in der HVZ statt. Flügelzüge gibt es nur in München.

Die betriebliche Herausforderung derartiger Stärkungs- und Schwächungsvorgänge betreffen sowohl die Fahrzeug- als auch die Personalplanung und -disposition. Dass das Mittel im Münchener Netz, das zu den drei Netzen mit dichtester Belegung auf der Stammstrecke gehört,[427] seit Jahren angewandt wird, belegt jedoch auch, dass die Risiken durchaus handhabbar sind. Die Vorteile wie der Nachfrage genauer angepasster Fahrzeugeinsatz und eine bessere Auslastung des nur in begrenzter Stückzahl verfügbaren Rollmaterials müssen jedoch mindestens die Nachteile wie höhere betriebliche Komplexität und erhöhten Personalbedarf zum Kuppeln und Trennen aufwiegen. In Hannover und München scheint dies der Fall zu sein.

Zwischen den Systemen von Helsinki, Kopenhagen, München und zum Teil Hannover, in denen es Angebotsverdichtungen durch längere Züge gibt, sind Unterschiede sichtbar, wie Abbildung 5.2.16 zeigt. In Helsinki und Kopenhagen wird deutlich stärker die Zugstärke erhöht, als dies in allen anderen Netzen der Fall ist. Der Verstärkungsfaktor pro Zugfahrt zeigt, dass nur in Hannover und München nicht ausschließlich an Endstationen die Zugstärke verändert wird, sondern auch unterwegs die Zugformation gestärkt bzw. geschwächt wird. Dies betrifft jedoch auch in diesen beiden Netzen nur einen kleinen Teil der Fahrten, so dass sowohl der Median als auch das obere Quartil dieses Wertes bei eins liegen.

[426] Die von Paderborn als Einfachtraktion kommende S5 der S-Bahn Hannover wird ganztägig in Hameln zur Doppeltraktion verstärkt.
[427] Vgl. Abbildung 5.2.5.

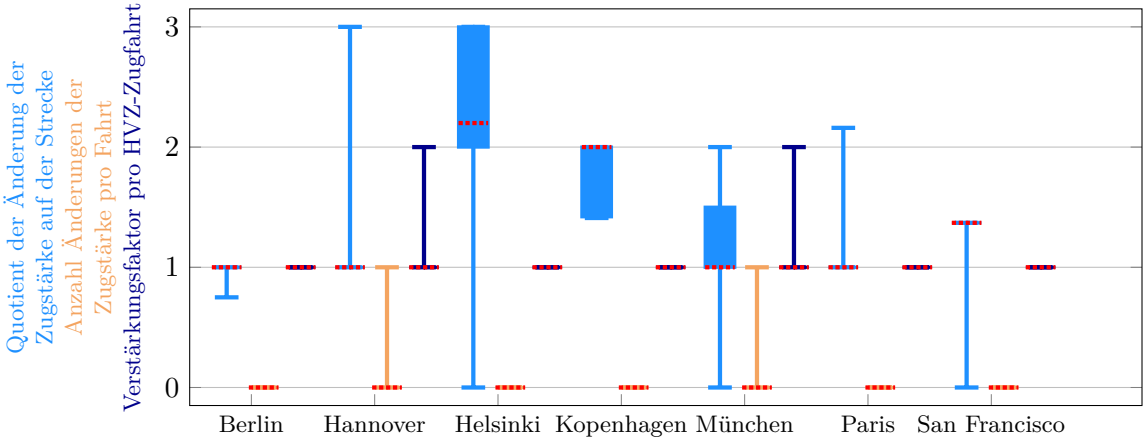

Abbildung 5.2.16: Zusammenfassung der Daten zur Zugstärke und ihrer Änderung in der HVZ.

Tabelle 5.2.4 zeigt die unterschiedliche Abwicklung von Fahrten entgegen der Lastrichtung. Die meisten Systeme geben diese Fahrten für Fahrgäste frei. Dies hat zwei Gründe: Einerseits lassen sich so mit diesen aus der Umlaufplanung resultierenden - und damit betrieblich motivierten - Fahrten Erlöse generieren[428] und andererseits gibt es trotz einer dominierenden Lastrichtung auch in der Gegenrichtung meist zumindest abschnittsweise starke Verkehrsströme.

Auf der RER-Linie A in Paris sowie in Helsinki, München und San Francisco gibt es auf einzelnen Strecken eine Dominanz der Fahrten in Lastrichtung, zu denen es in der HVZ keine Rückfahrten gibt. Die Fahrzeuge werden nach einer Fahrt zum Zentrum abgestellt und erst zur nachmittäglichen Spitze wieder eingesetzt. Das obere Quartil in Helsinki zeigt, dass 1,67 Fahrten in Lastrichtung nur eine Fahrt in Gegenrichtung gegenüber steht. In München und Paris beträgt dieser Faktor lediglich 1,04 bzw. 1,09.[429]

In den anderen Systemen ist die Relation zwischen Fahrzeiten und Ausdehnung der HVZ derart, dass die Fahrzeuge in demselben Umlauf mehrere Verstärkerfahrten durchführen können. Die jeweiligen Rückfahrten werden als reguläre Fahrgast- oder Leerfahrten durchgeführt. Leerfahrten gegen die Lastrichtung gibt es nur in München, Paris und San Francisco. In den übrigen Netzen sind alle Fahrten gegen die Lastrichtung für Fahrgäste freigegeben. Diese haben - abgesehen von einzelnen Ein- und Aussetzfahrten am Rand der Spitzenstunden - ein symmetrisches Fahrtenangebot in beide Richtungen.[430]

[428] In Systemen mit bestellten Verkehren gibt es in der Regel nur für Fahrgastfahrten direkte Bestellerentgelte. Die Erlöse sind Bestandteil der wirtschaftlichen Betrachtung in Abschnitt 5.3.2 auf Seite 208.

[429] In San Francisco liegt das obere Quartil ebenfalls bei 1 und nur das Maximum - zu finden auf dem äußersten Abschnitt - liegt größer 1. Vgl. Abbildung 5.3.4 auf Seite 210.

[430] In Hannover, München und Paris liegt das Minimum des Quotienten der Zugfahrten in Gegenrichtung unterhalb von eins, was durch einzelne Verstärkungszüge entgegen der Lastrichtung begründet ist. Diese

Tabelle 5.2.4: Fahrten entgegen der Lastrichtung.

Netz	Fahrgastfahrten	Fahrgastfahrten (Express)	Leerfahrt	ohne Rückfahrt
Berlin	X			
Hannover	X	X		
Helsinki	X	X		X
Kopenhagen	X	X		
München	X		X	X
Paris	X	X	X	X
San Francisco		X	X	

5.3. Wirtschaftliche Aspekte

Die wirtschaftlichen Aspekte der Betrachtung gliedern sich einerseits in die Erlöse und andererseits in die Kosten.

5.3.1. Erlöse

Die ermittelten Werte zu Erlösen gemäß der Definitionen und Annahmen in Abschnitt 3.2.3.1 zeigen das in Abbildung 5.3.1 zu sehende Spektrum pro erbrachtem Zugkilometer. Die Werte sind mit Vorsicht zu genießen und aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit und der daher notwendigen Annahmen nur bedingt aussagekräftig. Eine Aussage ist jedoch deutlich: Die in Paris eingesetzten Formationen bieten ein wesentlich größeres Platzangebot[431] als die Formationen der anderen Netze. Ein Grund ist der weitgehende Einsatz von Doppelstockzügen in Paris[432] sowie die große Zuglänge von über 200 Metern bei allen Zügen. Im Gegensatz dazu liegt der Fahrterlös in San Francisco vergleichsweise niedrig, was auf eine sehr geringe Stehplatzkapazität der eingesetzten Formationen schließen lässt.[433]

liegen jeweils am Rand der HVZ bzw. im Nachlauf der Lastrichtung am Ende des Stadtzentrums und sind daher in der Betrachtung zu berücksichtigen.

[431] Die Definition des Platzangebotes in Abschnitt 3.2.1.1 auf Seite 19 gilt es zu beachten: Betrachtet wird hier nur das Sitzplatzangebot, so dass auch andere Fahrzeuge durch womöglich mehr Stehplätze ein größeres Gesamtplatzangebot bieten, als hier dargestellt.

[432] Die beiden anderen Netze mit Doppelstockzügen sind in Abbildung 5.3.1 schwerer erkennbar: In Helsinki werden vergleichsweise wenige Doppelstocktriebzüge (Sm4) eingesetzt. San Francisco hat gemäß der Abbildung die zweithöchsten Erträge pro Zugkilometer.

[433] Mit Blick auf die möglichen Fahrtdauern in Abbildung 5.3.2 auf Seite 209 verwundert dies nicht.

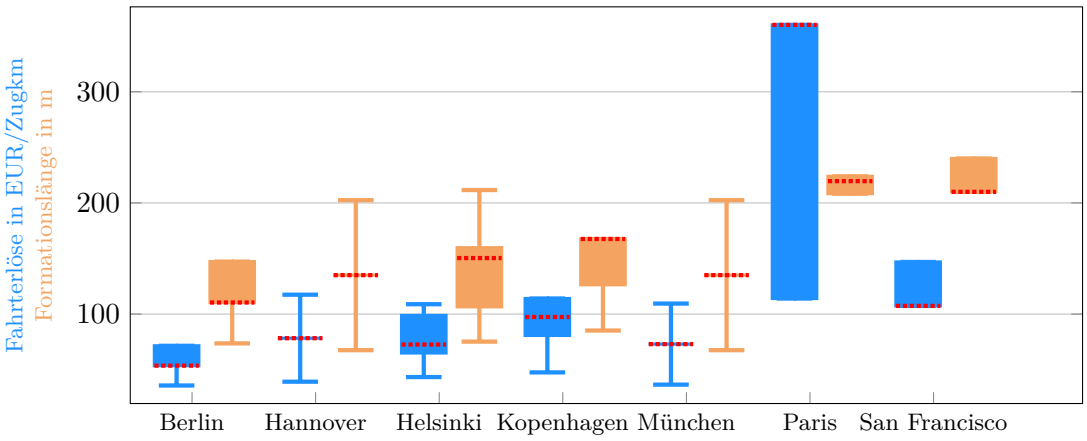

Abbildung 5.3.1: Erlöse und Längen der eingesetzten Zugformationen.

5.3.2. Kosten

Im Bereich der Kosten werden nach der Definition in Abschnitt 3.2.3 die Aufwandstreiber der EVU betrachtet.

Die für die Personaleinsatzzeit maßgebliche Fahrtdauer t_{Fahrt}[434] liegt in den Systemen zwischen drei und 138 Minuten pro Fahrt.[435] Die Minima resultieren aus kurzen Leerfahrten, Flügelzügen[436] oder kurzen Fahrten entgegen der Lastrichtung.[437] Der Median bewegt sich in den meisten Netzen im Bereich zwischen 51 und 59 Minuten. Ausreißer nach unten ist Helsinki, wo der Median bei nur 22 Minuten pro Fahrt liegt. Am anderen Ende der Skala liegt San Francisco, wo die Fahrten im Median 68 Minuten dauern.

Helsinki und San Francisco sind in einem weiteren Punkt anders als die anderen Netze: In beiden Netzen liegt der Bereich vom oberen bis zum unteren Quartil der Gesamtfahrten unter dem entsprechenden Bereich der Fahrten in Lastrichtung. In den anderen Netzen ist es umgekehrt. Der Hauptgrund ist die Netzstruktur: Das Netz in Helsinki sowie Caltrain sind ausgerichtet auf einen zentralen Endpunkt, der jeweils ein Kopfbahnhof ist. Die anderen Netze haben alle Radialen, die im Zentrum über eine oder mehrere Stammstrecken miteinander verbunden sind. In San Francisco kommt dazu, dass entgegen der Lastrichtung keine Züge die Gesamtstrecke

[434] Die weiteren Bestandteile der Dienstdauer wurden gemäß der Definition in Abschnitt 3.2.3.5 auf Seite 60 ausgespart.

[435] Siehe jeweils rechte Säule in Abbildung 5.3.2.

[436] In München wird die S1 in Neufahrn geflügelt. Der eine Zugteil verkehrt mit derselben Zugnummer weiter, der andere Zugteil bekommt eine neue Zugnummer und wird entsprechend als neue (kurze) Fahrt gewertet.

[437] Dies findet man in Paris auf der RER-Linie E, wo eine Zuggruppe in stadtauswärtiger den ersten kurzen Abschnitt vom Endbahnhof Haussmann Saint Lazare zur folgenden Station Magenta als Fahrgastfahrt zurücklegt, um danach leer weiter stadtauswärts zu fahren.

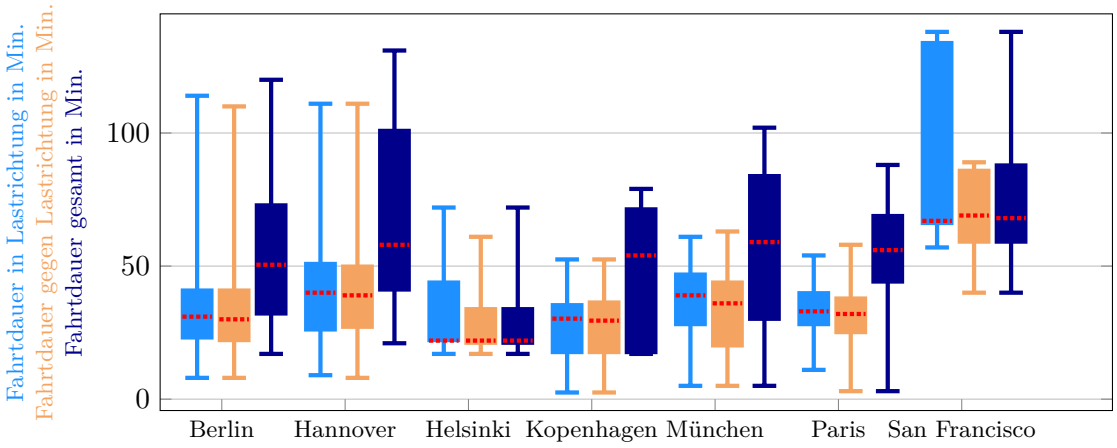

Abbildung 5.3.2: Fahrtdauer in Lastrichtung sowie entgegen der Lastrichtung.

befahren und so die wenigen Züge in Lastrichtung von Gilroy nach San Francisco ein besonderes Gewicht haben. In Helsinki ist es auf dem Ast von Karjaa ebenso. Ferner gibt es auch auf den anderen Streckenästen in Helsinki mehr langlaufende Fahrten in Lastrichtung als in Gegenrichtung gibt.

Neben der durch das Durchfahren von Stationen eingesparten Umlauf- und Personaleinsatzzeit sparen EVU durch das Auslassen von Stationen auch Stationsentgelte. Der dazu ermittelte Quotient zwischen haltenden und durchfahrenden Zügen, im weiteren Verlauf als *Anteil haltender Züge pro Station* bezeichnet (η_{DH}), zeigt in den betrachteten Netzen die klare Dominanz der haltenden Züge gegenüber den durchfahrenden Zügen.[438] In den Netzen mit ganztägigen Expressfahrten in Helsinki und Paris sieht man jedoch auch, dass das untere Quartil bei rund 0,7 liegt: An zahlreichen Stationen fahren mindestens 30 % der Züge ohne Halt durch. Im Netz von DSB S-tog betreffen die ganztägigen Expressfahrten jedoch im Verhältnis deutlich weniger Stationen, so dass hier das untere Quartil bei 1 liegt. Einzig in San Francisco liegt der Median nicht bei 1. Hier sind die Stationen in der Mehrheit, an denen 40 % oder mehr Züge durchfahren.

Maßgeblicher Treiber der von den EVU zu entrichtenden Trassenentgelte ist die durch die Zugfahrten zurückgelegte Länge. Die aus Gründen der Umlaufplanung entgegen der Lastrichtung in einigen Netzen durchgeführten Leerfahrten erzeugen ebenso wie die kommerziellen Züge Trassenentgelte, generieren jedoch keine Fahrgelderlöse. In den Netzen von München, Paris und San Francisco gibt es einzelne Leerfahrten entgegen der Lastrichtung, wie der in der jeweils rechten Säule in Abbildung 5.3.4 dargestellte entsprechende Quotient ($\eta_{F,GL}$) zeigt.

[438] Vgl. Abbildung 5.3.3.

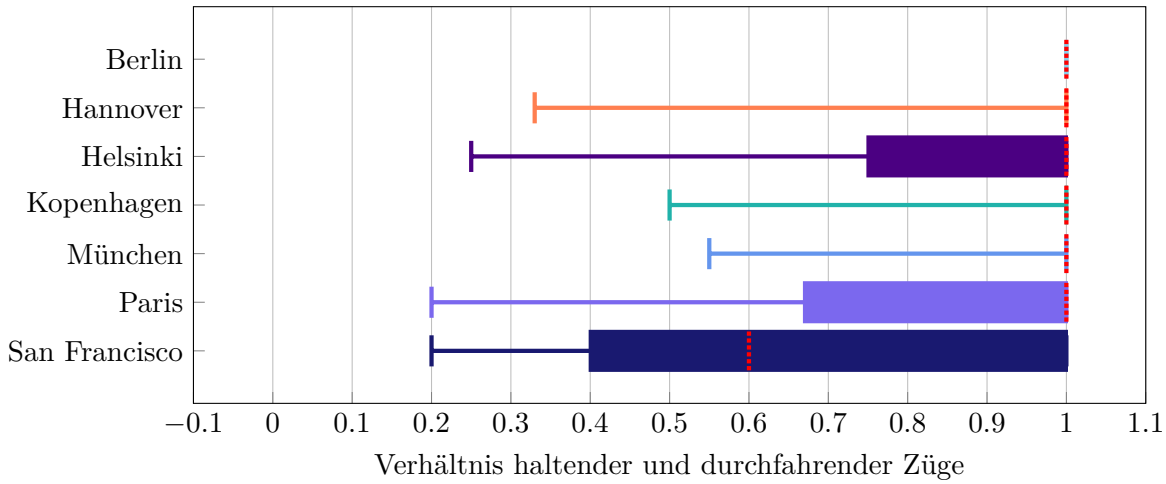

Abbildung 5.3.3: Anteil haltender Züge pro Station.

Im Maximum ist dies in Paris auf einzelnen Abschnitten jede zweite Fahrt. Das obere Quartil liegt in diesem Netz bei 0,13. Die anderen Netze gleichen die Dominanz der Lastrichtung nicht durch Leerfahrten in Gegenrichtung aus: In diesen Netzen gibt es entweder ein symmetrisches Fahrtenangebot in beiden Richtungen[439] oder einige Fahrten haben in der HVZ keine Rückfahrten.[440]

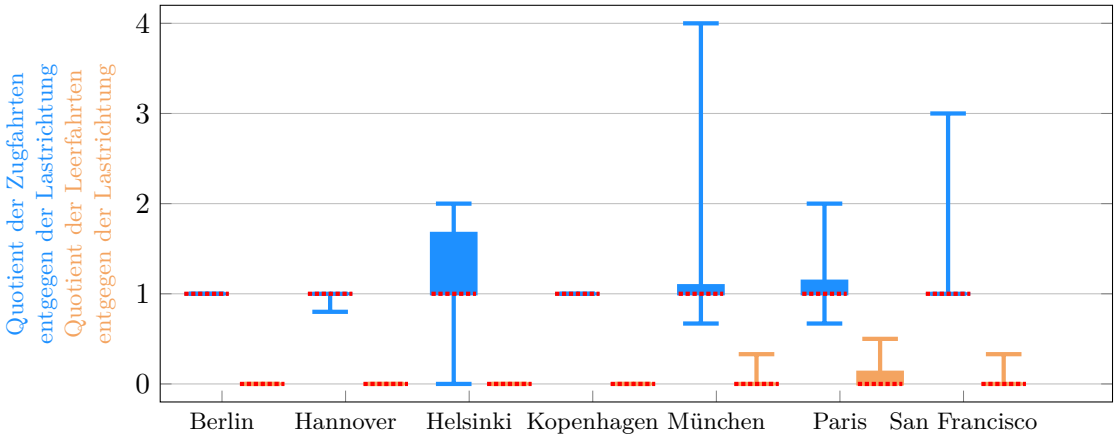

Abbildung 5.3.4: Quotienten der Fahrten entgegen der Lastrichtung.

Die in Abbildung 5.3.5 in der jeweils rechten Säule dargestellte Fahrtlänge korreliert erwartungsgemäß mit der in Abbildung 5.3.2 gezeigten Dauer der Fahrten. Bezüglich des den EVU entstehenden Aufwands für Trassenentgelte ist der in Abbildung 5.3.4 in der jeweils linken Säule dargestellte Quotient der Zugfahrten entgegen der Lastrichtung hinzuzuziehen. Dieser

[439] Dies ist in Berlin und Kopenhagen ausschließlich der Fall.
[440] Das ist in Helsinki, teilweise in München und in Paris auf der RER-Linie E der Fall.

zeigt, dass in den Netzen von Hannover, München und Paris auf einzelnen Abschnitten entgegen der Lastrichtung mehr Züge verkehren als in Lastrichtung. In absoluten Zahlen streuen die Mediane größer als bei der Fahrtdauer. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Höchst- und Reisegeschwindigkeiten der jeweiligen Netze. Bei den bezüglich der Fahrtdauer eng beeinander liegenden Netzen zieht sich das Feld weiter auseinander. Wenngleich die Mediane der Fahrtdauern in Hannover und Berlin nur sieben Minuten auseinander liegen, gibt es in der Fahrtlänge einen beachtlichen Unterschied zwischen 32 km (Berlin) und 63 km (Hannover). Dieser resuliert aus der in Hannover deutlich höheren Reisegeschwindigkeit als Ergebnis der Expressfahrten.

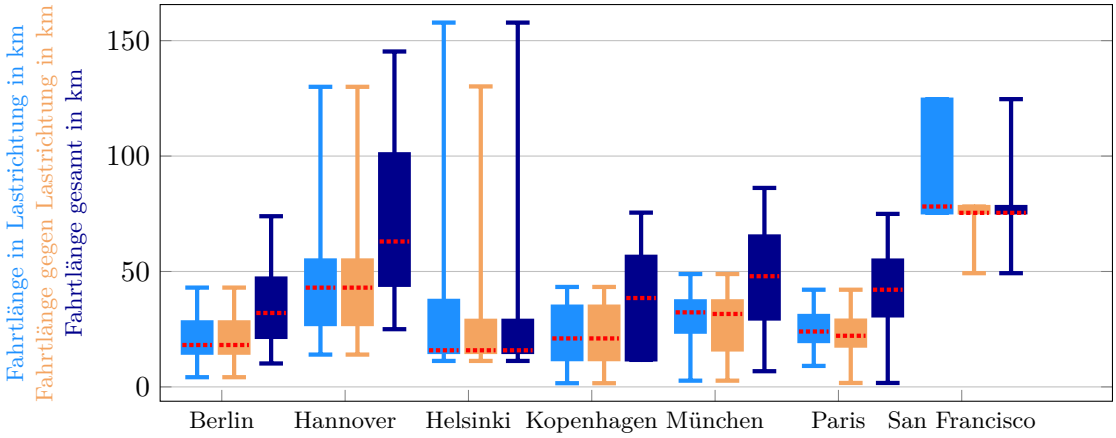

Abbildung 5.3.5: Fahrtlängen in Lastrichtung sowie entgegen der Lastrichtung.

Die Kosten für Fahrzeugunterhalt und -instandhaltung (K_{FZ}) sind abhängig von der Laufleistung und korrelieren damit, unter Berücksichtigung der Formationen, mit den im vorhergehenden Abschnitt 440 betrachteten und in Abbildung 5.3.5 dargestellten Fahrtlängen.

Abbildung 5.3.6 zeigt in der jeweils rechten Säule die auf Basis der Referenzfahrzeuge berechneten Fahrzeugkosten. Diese liegen bei den größeren bzw. längeren Fahrzeugen in Paris in San Francisco deutlich über den Werten der übrigen Netze. In San Francisco ist zu beachten, dass hier Dieselfahrzeuge zum Einsatz kommen, weshalb die Kosten noch über den bezüglich der Erlöse höchsten Werte in Paris liegen.[441]

Auffällig ist, dass einzig bei den für Berlin gewählten Referenzfahrzeugen das Niveau der Kosten für Fahrzeugunterhalt und -instandhaltung pro Kilometer niedriger ist als die Fahrzeugenergiekosten. Die Ursache liegt in den in den Abschnitten 3.2.3.6 und 3.2.3.7 definierten Kostensätzen. Diese sind einzig bei dem Referenzfahrzeug, das für die Viertelzüge der S-Bahn

[441] Vgl. Abschnitt 5.3.1.

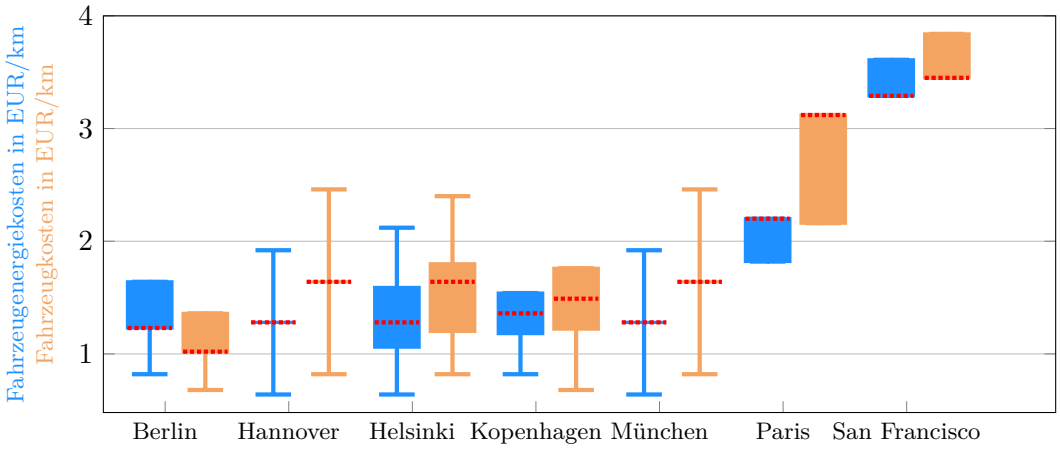

Abbildung 5.3.6: Fahrzeugkosten und Fahrzeugenergiekosten.

Berlin sowie die kürzeren Fahrzeuge von DSB S-tog Kopenhagen verwendet wird, höher in den Energiekosten pro Kilometer als in Unterhalt und Instandhaltung.[442]

Den Energiebedarf pro Abfahrt und Zuglängenmeter in den einzelnen Netzen zeigt vergleichend Abbildung 5.3.7. Die Werte streuen sehr stark, da sie einerseits stark von den eingesetzten Fahrzeugtypen und andererseits von den zulässigen Höchstgeschwindigkeiten im Bereich der Halte abhängen.[443] In Berlin, dem einzigen Netz ohne jegliche Expressfahrten und ausgelassenen Halte, ist der Energiebedarf pro Zuglängenmeter am geringsten. Der Streubereich in den anderen Netzen unterscheidet sich nicht zwischen den Netzen mit sehr homogenem Fahrzeugpark (Hannover, Kopenhagen, München, San Francisco) und jenen mit einer größeren Vielfalt (Helsinki, Paris). Hier macht sich die große Geschwindigkeitsspanne[444] bemerkbar, die in Gleichung 3.2.31 quadratisch eingeht. Dies erklärt auch den vergleichsweise niedrigen Energiebedarf in Berlin, da hier die zulässige Höchstgeschwindigkeit am niedrigsten ist.

Die Betrachtung des Energiebedarfs pro Abfahrt und Sitzplatz korreliert weitgehend mit dem Bedarf pro Zuglängenmeter. Eine deutliche Ausnahme ist Paris: Durch den überwiegenden Einsatz von Doppelstockzügen mit einem besonders großen Sitzplatzangebot ist der Energiebedarf pro Sitzplatz in diesem Netz relativ niedrig. Auch in San Francisco drückt sich das hohe Sitzplatzangebot in einem eher geringen Energiebedarf pro Abfahrt und Sitzplatz aus.

[442] Diese Viertelzüge sind bei Unterhalt/Instandhaltung auch in Vierfachtraktion günstiger pro Meter Zuglänge als die übrigen Fahrzeugtypen. Bei den Energiekosten liegen sie im Mittelfeld hinter den beiden Referenzfahrzeugtypen mit Dieselloks (NV D+7/8) sowie dem doppelstöckigen Fahrzeugtyp NV 600. Siehe Darstellung in Tabellen 3.2.3 und 3.2.4.

[443] Vgl. Gleichung 3.2.31 auf Seite 67.

[444] Siehe linke Säule in Abbildung 5.2.3 auf Seite 194.

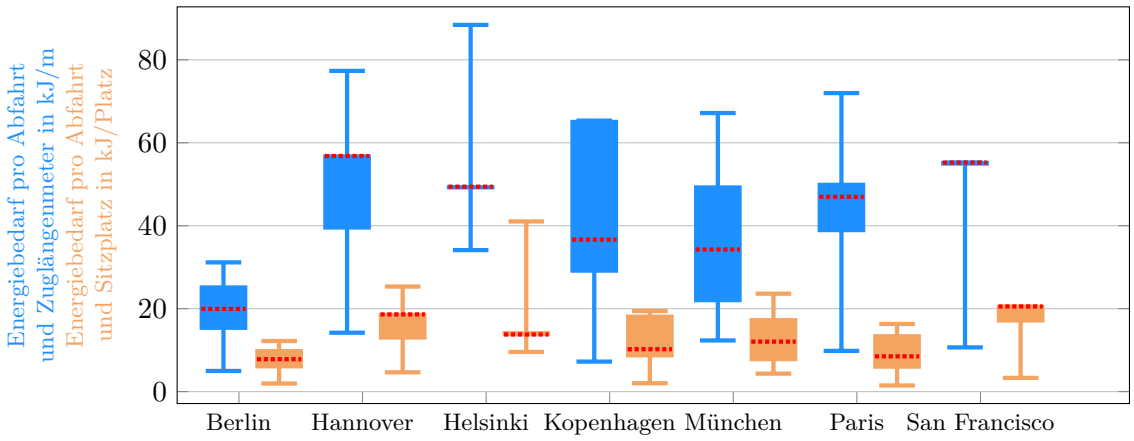

Abbildung 5.3.7: Energiebedarf pro Abfahrt und Zuglängenmeter bzw. Sitzplatz.

5.4. Zusammenfassung

Die Erkenntnisse der Analysen der Fallbeispiele in den drei Bereichen *Verkehr*, *Betrieb* und *Wirtschaftlichkeit* sollen in diesem Abschnitt abschließend zusammen betrachtet werden. Zunächst erfolgt eine besondere Betrachtung des Fallbeispiels eines einzelnen Korridors, bevor im Anschluss die Gesamtheit der Fallbeispiele analysiert wird.

5.4.1. Aussagekraft bei Betrachtung eines einzelnen Korridors

Betrachtet man das als Fallbeispiel für einen einzelnen Korridor anstelle eines gesamten Netzes herangezogene Fallbeispiel Caltrain (San Francisco) im Vergleich zu den übrigen Netzen, fällt auf, dass dieses System bei einigen Vergleichskriterien allein den Maximalwert aller Netze liefert. Dabei liegen die Abweichungen teilweise im sehr geringen Bereich,[445] teilweise jedoch auch in signifikanter Höhe, wie Tabelle 5.4.1 zeigt. Bei zwei Vergleichskriterien belegt San Francisco gemeinsam mit weiteren Netzen den Maximalwert.[446] Die Varianz der Fahrtlänge liegt mit 24,51 in San Francisco niedriger als in den übrigen Fallbeispielen (32,92). Gleiches gilt für den Anteil der Endstellen an der Gesamtzahl der Stationen (10,71% gegenüber 13,64%).

Die fünf Kriterien, in denen die Werte in San Francisco deutlich abweichen, haben drei Ursachen: Der erste Block resultiert aus der sehr starken Verdichtung des Verkehrsangebotes. Einer

[445] Dies betrifft die folgenden Kriterien: *Quotient Platzangebot* (5,74 in San Francisco vs. 5 in den übrigen Netzen), *Reisezeitgewinn pro ausgelassenem Halt* (4 vs. 3,5), *Quotient ausgelassener Halte* (0,76 vs 0,69), *Formationslänge* (240 vs 224), *Fahrtdauer (Last- und Gegenrichtung HVZ* (138 vs 131) und *Fahrzeugunterhalt und -instandhaltung* (3,84 vs 3,12).

[446] Dies sind *Umsteigezwänge* und *Quotient haltender und durchfahrender Züge.*

Tabelle 5.4.1: Abweichungen zwischen Caltrain, San Francisco, und den übrigen Netzen (Maximalwerte).

Vergleichskriterium	San Francisco	Übrige Netze
Quotient der Verkehrsangebotsleistung	5,74	4,75
Quotient Stationshalte	5	3
Quotient Anzahl der Zugfahrten	5	3
Fahrtdauer in Lastrichtung in der HVZ	138	114
Energiekosten	3,61	2,2

Zugfahrt pro Stunde und Richtung in der NVZ stehen fünf Fahrten in der HVZ gegenüber. Eine derartige Verdichtung ist herausragend, jedoch kein Spezifikum dieses Netzes. Sie könnte prinzipiell auch in anderen Netzen zu finden sein. Die längere Fahrtdauer in Lastrichtung ist ebenfalls keine Eigenschaft eines einzelnen Korridors und kann auch in anderen Netzen zu finden sein, sofern die Streckenlänge in Lastrichtung - wie hier zu einem zentralen Endbahnhof - in Verbindung mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit hinreichend lang ist. Im Vorortverkehr Helsinki liegt die maximale Fahrtdauer bei etwa gleicher Fahrtlänge gut 20 Minuten niedriger, weil auf einem Teil der Strecke die erreichte Höchstgeschwindigkeit höher liegt und zudem der Halteabstand auf diesen Fahrten deutlich größer ist. Dass die Energiekosten bei Caltrain deutlich höher liegen als in den übrigen Netzen, überrascht nicht, da hier im Gegensatz zu den anderen Netzen Diesellokomotiven im Einsatz sind, deren Energiekosten auf Basis der angesetzten Referenzfahrzeuge mehr als das Dreifache pro Fahrzeugkilometer betragen als bei Elektrofahrzeugen.[447]

Betrachtet man die ermittelten Quotienten der übrigen Netze sind auch dort Ausprägungen einzelner Korridore mit gleichartigem Angebot erkennbar.[448] Im Gegensatz zu der Betrachtung eines ganzen Netzes bleibt jedoch auch bei der Darstellung der Werte eines einzelnen Korridors die Aussagekraft zur Verdichtung erhalten.

Da die Beschreibung weitgehend auf dem Median je Vergleichskriterium in den einzelnen Netzen beruht, sind die Auswirkungen einzelner *Ausreißer* in den betrachteten Netzen weniger gravierend. Bei Betrachtung einzelner Korridore wie Caltrain greift dieses Mittel nicht und Extremwerte schlagen sich direkt in den Werten nieder, wie beispielsweise Abbildung 5.1.6 zeigt: Hier wirken die Maximalwerte sowie der große Bereich zwischen unterem und oberem Quartil in San Francisco sehr groß. Tatsächlich stehen dahinter jedoch *nur* fünf Fahrten pro Stunde auf einer einzelnen Strecke. Da auch dieser einzelne Korridor jedoch abgesehen von den oben genannten und begründeten Ausnahmen in den Bereichen der Mediane der übrigen Netze liegt, ist die Methodik auch auf Korridore anstelle von ganzen Netzen anwendbar. Um

[447] Vgl. Tabelle 3.2.4 auf Seite 64.
[448] Vgl. z. B. Abbildung 4.4.6 auf Seite 125.

Vergleichbarkeit zu wahren, ist in diesem Fall jedoch auf einzelne Extremwerte besonders zu achten.

5.4.2. Ausprägungen der Differenzierung

Die zuvor in den Beschreibungen der einzelnen Netze in Abschnitt 196 jeweils groß abgedruckten Diagramme zu den verkehrlichen, betrieblichen und wirtschaftlichen Aspekten werden in den folgenden Abbildungen noch einmal nebeneinander gestellt und in ihrer visuellen Ausprägung verglichen. Diese bietet einen Eindruck des Grades der Differenzierung.[449]

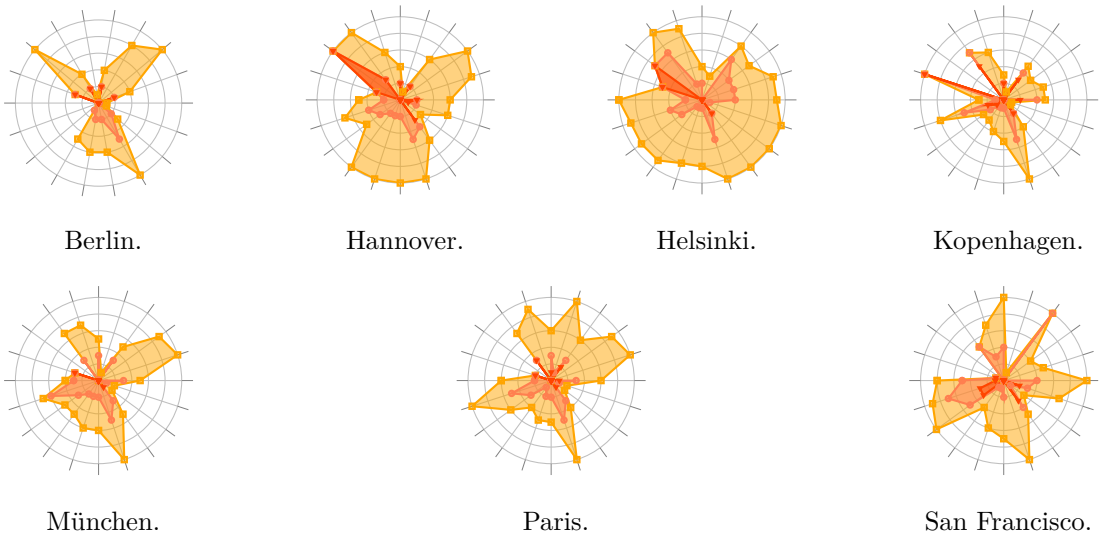

Abbildung 5.4.1: Verkehrliche Differenzierung in den sieben untersuchten Netzen.

Im verkehrlichen Bereich[450] fällt auf, dass die Netze in Berlin und Kopenhagen über alle Aspekte eine vergleichsweise geringe Differenzierung aufweisen. In Berlin gibt es einzelne Ausreißer, der Median liegt jedoch überwiegend im unteren Bereich der verglichenen Systeme. In Kopenhagen gibt es abgesehen von einer Ausnahme bei den Umsteigezwängen, die in allen Netzen im Maximum gleich sind, geringere Maximalwerte als in den übrigen Netzen. Während es in Berlin eine leichte Verdichtung des Angebotes in der HVZ über zusätzliche Züge gibt, wird in Kopenhagen vor allem über längere Züge verdichtet. Auf der anderen Seite steht das Netz von Helsinki, das in deutlich mehr Aspekten sowohl im Maximum als auch in den Medianen ausgeprägter differenziert ist. Hier macht sich der Unterschied zwischen den sehr nahen Vororten, die mit sehr dichtem Angebot an das Zentrum angebunden sind, und den weiter entfernt liegenden

[449] Siehe Abschnitt 187 auf Seite 70 zur Erläuterung dieser Darstellungsform. Die im Detail lesbaren Diagramme, die in diesem Abschnitt nur verkleinert dargestellt sind, sind in den Beschreibungen der einzelnen Systeme in Kapitel 4 zu finden.

[450] Vgl. Abbildung 5.4.1.

Städten mit eher dünnem Angebot bemerkbar. Die übrigen Netze liegen dazwischen und haben - in jeweils unterschiedlichen Dimensionen - mehr oder weniger starke Differenzierung.

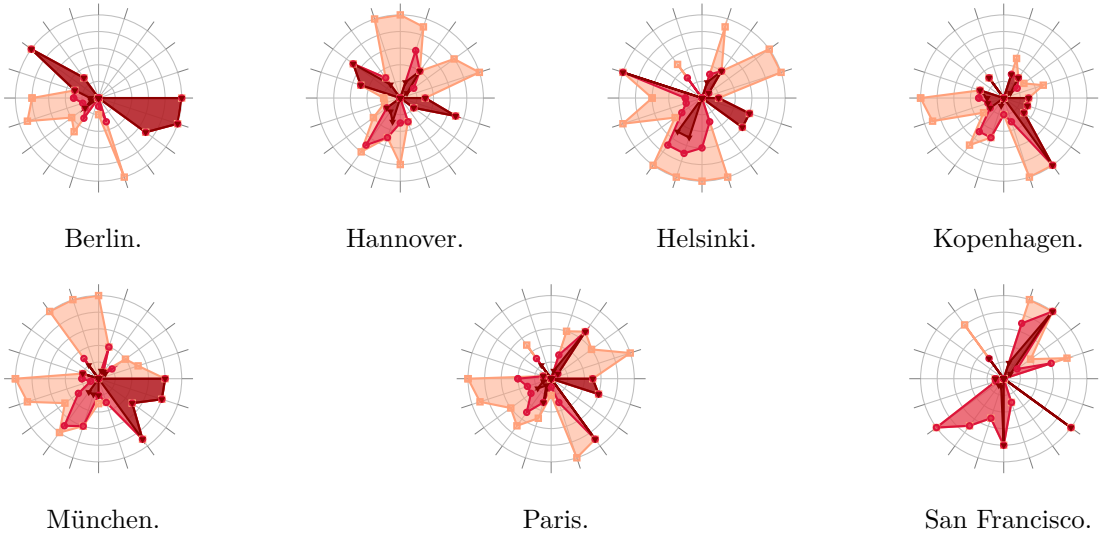

Abbildung 5.4.2: Betriebliche Differenzierung in den sieben untersuchten Netzen.

Der betriebliche Vergleich in Abbildung 5.4.2 zeigt ein gemeinsames Muster in den Netzen von Kopenhagen, München und Paris: Dieses resultiert aus dem Maximum an Zugfahrten und dem Vorhandensein eines kontinuierlich wirkenden Zugbeeinflussungssystems zumindest auf den am stärksten befahrenen Abschnitten.[451] Durch die geringe Anzahl an Zügen und die Verfünffachung der Zugfahrten sind die Maximalwerte in San Francisco sehr dominant. Hier ist die in Abschnitt 5.4.1 genannte stärkere Wirkung der Extrema auf einzelnen Korridoren gegenüber ganzen Netzen bemerkbar. In den übrigen Aspekten sind keine klaren Gemeinsamkeiten erkennbar, wenngleich die Netze mit einer Verdichtung über zusätzliche Fahrten eine betrieblich stärkere Differenzierung aufweisen als das Netz in Kopenhagen, wo nahezu ausschließlich über die Zuglänge differenziert wird und kaum zusätzliche Fahrten entstehen.

In der wirtschaftlichen Beschreibung, deren Kreisdiagramme Abbildung 5.4.3 zeigt, gibt es als Gemeinsamkeit in allen Netzen die Dominanz der haltenden Züge. Einzig in San Francisco ist der Median in diesem Aspekt nicht gleich dem Maximum aller Netze. Paris und San Francisco stechen durch größere Formationen als in den übrigen Netzen heraus. Sehr lange Fahrten gibt es in Hannover und Helsinki. Die entsprechenden Werte in Berlin, Kopenhagen, München und Paris sind hingegen ähnlich niedrig. Bei der Fahrtdauer (und damit der Personaleinsatzzeit) sieht es anders aus: Hier weisen Berlin und Hannover, gefolgt von München die größten Längen

[451] Dies sind SACEM in Paris auf der Stammstrecke der RER A, LZB auf der Stammstrecke in München sowie HKT nahezu im Gesamtnetz in Kopenhagen.

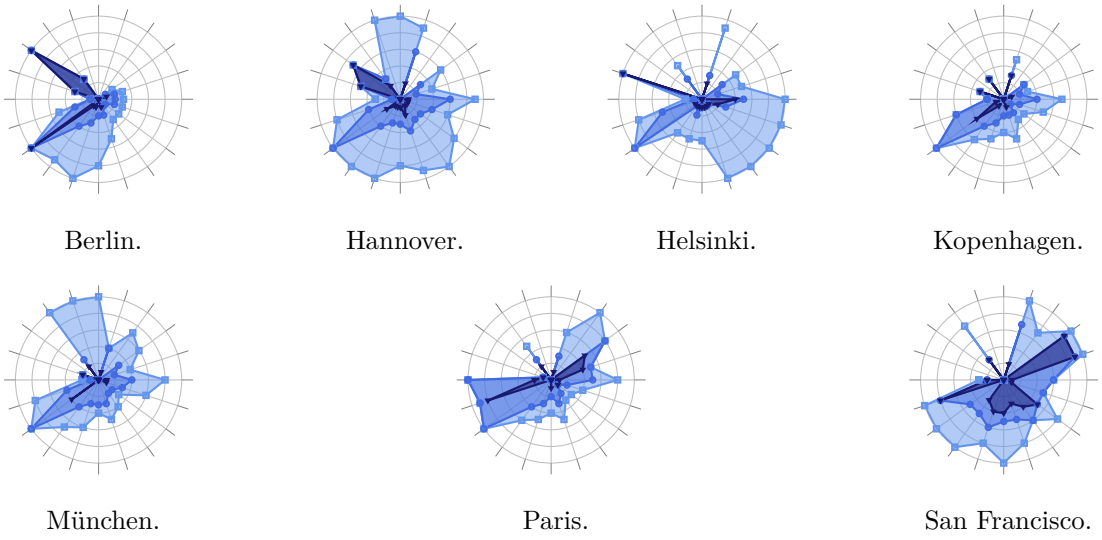

Abbildung 5.4.3: Wirtschaftliche Differenzierung in den sieben untersuchten Netzen.

auf, was auf niedrige Reisegeschwindigkeiten schließen lässt.[452] Insgesamt gilt ähnlich wie zuvor in der verkehrlichen Betrachtung, dass die Differenzierung in Berlin und Kopenhagen eher geringer ist. In Helsinki sowie auch in Hannover und Paris sind die Ausprägungen deutlich stärker.

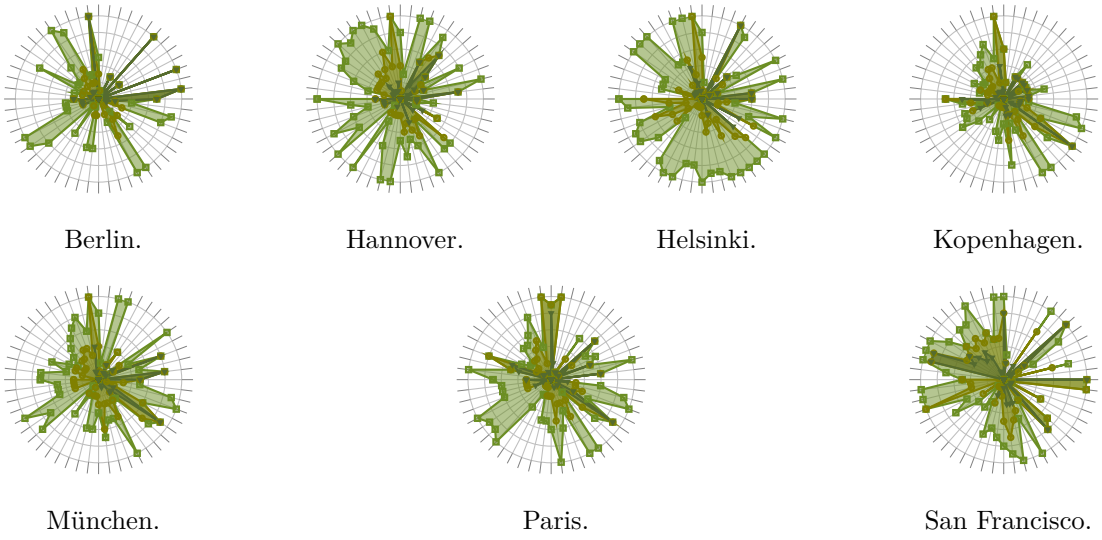

Abbildung 5.4.4: Alle Vergleichskriterien in den sieben untersuchten Netzen.

Der Blick über alle drei Bereiche untermauert die zuvor gemachten Feststellungen, dass bei den gewählten Vergleichsparametern die Netze von Berlin und DSB S-tog Kopenhagen schwächer differenziert sind als insbesondere die Netze von Hannover und Helsinki. Der betrachtete

[452] Die Reisegeschwindigkeit ist in den Diagrammen in Abbildung 5.4.1 zu sehen.

einzelne Korridor von Caltrain in San Francisco ist ebenfalls über alle Aspekte vergleichsweise stark differenziert.

5.4.3. Erkenntnisse aus der Klassifizierung

Die im vorhergehenden Abschnitt 5.4.2 eher auf visueller Basis getroffenen Erkenntnisse sollen nachfolgend zusammenfassend analysiert werden. Übergreifend aus den drei betrachteten Bereichen der Fallbeispiele lassen sich die folgenden Erkennisse zusammenfassen.

Das planerische Maximum an Fahrten liegt bei 30 Fahrten pro Gleis, Richtung und Stunde. Dabei gibt es in den drei Netzen mit dieser Zugdichte auf den Stammstrecken in Kopenhagen, München und Paris jeweils nur ein Bahnsteiggleis[453] pro Richtung. Ausnahme sind die Verzweigungsbahnhöfe, der Hauptbahnhof in Kopenhagen sowie der Bahnhof La Défense in Paris, der kurz vor dem Ende der Stammstrecke liegt. Die 30 Züge einer Richtung halten entsprechend an mehreren aufeinander folgenden Stationen an denselben Bahnsteigkanten, so dass neben gegebenfalls noch möglichen Verkürzungen der technischen Zugfolgezeiten auf der freien Strecke die Fahrgastwechselzeiten die obere Grenze von 30 Fahrten pro Stunde und Gleis festlegen.

Alle Netze sind in ihren zentralen und zentrumsnahen Bereichen mindestens zweigleisig. In einzelnen Netzen stehen zumindest für den Störungsfall, teilweise auch für zusätzliche Züge,[454] weitere nutzbare Gleise zur Verfügung.

In den Netzen mit über Stammstrecken verbundenen Radialen liegt die Gesamtfahrzeit erwartungsgemäß über jener in Lastrichtung. Die Varianz der Fahrtlänge liegt in diesen Netzen in einem Bereich von 30 bis 50 Prozent und resultiert meist aus einer Zwischenendstelle pro Streckenast etwa auf halber Entfernung vom Streckenendbahnhof. In Netzen mit einem Kopfbahnhof als Hauptziel ist die Fahrtdauer in Lastrichtung größer als in Gegenrichtung.[455] Hier gibt es eher am Netzrand liegende Abschnitte, die nur in der HVZ und nur in Lastrichtung befahren werden. Die klassischen Stadtschnellbahnsysteme in den - für ihre jeweilige Region - dominierenden Ballungsräumen von Berlin, Kopenhagen, München und Paris haben jeweils eine gleichartige Netzausdehnung im Bereich von rund 40 km ausgehend von den zentralen Punkten. Das überrascht vor dem Hintergrund, dass die Einwohnerzahlen der Ballungsräume unterschiedlich sind und insbesondere Kopenhagen mit seiner Hauptstadtregion deutlich weniger Einwohner hat als die übrigen Regionen.

[453] In München gibt es an drei Stationen der Stammstrecke Bahnsteigkanten auf beiden Seiten der Gleise.
[454] In München und teilweise in Helsinki verkehren Verstärkungszüge über die parallel verlaufendne Ferngleise.
[455] Vgl. Abschnitt 5.3.2.

Abschnittsweise Expressfahrten gibt es sowohl in eher dünn befahrenen Netzen (S-Bahn Hannover) als auch in den drei Netzen mit sehr dichter Zugfolge. In Berlin gibt es keine Expressfahrten. Es gibt sowohl Netze, in denen ganztägig Expressfahrten verkehren (Hannover, Helsinki, Kopenhagen, Paris) und solche, in denen dieses Mittel nur in der HVZ zum Einsatz kommt (München, San Francisco). In allen Netzen findet die alternierende Bedienung jedoch nur außerhalb der Stammstrecken statt - in Abschnitten, auf denen nicht die dichteste Zugfolge erreicht wird. Das gilt sowohl für Netze mit *Zonenbetrieb* (Vuchic 1986, S. 318) als auch solche mit *Skip-Stop Operation* (Vuchic 1981, S. 65).

Die Abwicklung von Leerfahrten unterscheidet sich zwar in den unterschiedlichen Netzen, steht jedoch nicht in Zusammenhang mit den anderen Parametern. Der Verzicht auf Fahrten entgegen der Lastrichtung erfordert entsprechende Abstellmöglichkeiten, erhöht jedoch entgegen der Lastrichtung in dicht befahrenen Netzen die Betriebsstabilität, da nur die verkehrlich notwendige Zahl an Fahrten stattfinden und die Kapazität nicht zusätzlich durch betrieblich motivierte Fahrten ausgeschöpft wird.

Zwischenendstellen gibt es in allen Netzen etwa halb so viele wie *echte* Endstellen. Während einige Netze auch im Bereich der Stammstrecken endende Züge in der HVZ haben, verzichten andere Netze wie Paris[456] darauf, was der Betriebsstabilität zu gute kommt.

Änderungen der Zugstärke im Fahrtverlauf erhöhen die betriebliche und verkehrliche[457] Komplexität und werden daher nur sehr wenig eingesetzt. Die meisten Systeme setzen in der HVZ ausschließlich oder mindestens überwiegend Züge mit maximaler Länge ein.

Das Auslassen einer Station bringt unabhängig von der Lage und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in allen Netzen rund eine Minute Reisezeitgewinn.[458] Der relative Reisezeitgewinn liegt in den Netzen mit ganztägig verkehrenden abschnittsweisen Expressfahrten bei 20 bis 40 %.

Wie zu erwarten, wird das Angebot in der HVZ in weiteren Bereichen verdichtet. Es gibt in allen Netzen jedoch in den Außenbereichen Stationen, die keine Verdichtung durch mehr Zugfahrten erfahren. In Paris gibt es aufgrund einer höheren Zahl an Zugfahrten auf der Strecke und der damit einhergehenden alternierenden Bedienung sogar eine Reduktion von Halten an drei Stationen.[459]

[456] Die in Paris in den Endbereichen der Stammstrecken endenden Fahrgastfahrten fahren weiter als Leerzug zu einem Bahnhof außerhalb der Stammstrecke.
[457] Die Fahrgastinformation muss die einzelnen Fahrzeuge eines Zuges unterschiedlich behandeln.
[458] Vgl. Abschnitt 5.1.1.
[459] Vgl. Ausführungen in Abschnitt 378 auf Seite 185.

Während in den meisten Netzen auf dem größeren Teil der Abschnitte das Platzangebot in der HVZ verdichtet wird, gibt es in den deutschen Systemen viele Abschnitte, auf denen das Platzangebot (nahezu) unverändert bleibt. In Paris und München gibt es zudem jeweils kurze Abschnitte, auf denen das Platzangebot gegenüber der NVZ sogar verringert wird, weil entweder weniger Züge die Station bedienen (Paris) oder in der NVZ längere Züge im Einsatz sind (München). In Kopenhagen hingegen ergibt sich an sämtlichen Stationen durch den Einsatz längerer Züge auf allen Linien eine signifikante Erhöhung des Platzangebotes.

Die Angebotsverdichtung muss nicht alle Stationen eines Linienastes betreffen. Zur Reisendenlenkung oder zur Erhöhung der Kapazität können in der HVZ zusätzliche Fahrten einzelne Zwischenhalte auslassen oder alle Fahrten in ihrer Bedienung so verändert werden, dass sich trotz zusätzlicher Fahrten an einigen Stationen ein unverändertes Fahrtenangebot ergibt. Der Vergleich der Quotienten der Zugfahrten und der Stationshalte zeigt dies besonders für Caltrain, wo in der HVZ fünf Fahrten pro Stunde die Strecke bedienen, jedoch abgesehen von den Endbahnhöfen die Mehrheit der Stationen maximal von zwei Zügen bedient werden.

Abgesehen von Helsinki und San Francisco dominiert auf den allermeisten Abschnitten der betrachteten Netze eine rhythmische Verteilung der Zugfahrten ohne Varianz der Abfahrtsabstände. Das obere Quartil dieses Wertes liegt in allen Netzen zwischen 20 und 54 %.

Zwei der drei am dichtesten befahrenen Netze (München und Kopenhagen) verdichten ihr Angebot neben zusätzlichen Zügen deutlich durch den Einsatz längerer Züge. Das gleiche Mittel wird im insgesamt schwächer befahrenen Netz von Helsinki in noch stärkerem Maße eingesetzt. In den anderen Netzen verkehren ganztägig (weitgehend) die gleichen Formationen.

In der Verteilung des Platzangebotes gibt es drei Gruppen von gar keiner Differenzierung und (nahezu) homogenen Zugformationen über (meist rhythmische) Differenzen durch sich abwechselnde unterschiedlich lange Züge bis zu sehr starker Differenzierung durch eine große Vielfalt unterschiedlicher Formationen.[460] Eine Ursache ist die Historie, da diese Differenzierung unter anderem aus dem verfügbaren Fahrzeugpark resultiert. Dieser ist in Helsinki, dem Netz mit der größten Differenzierung in diesem Punkt, derzeit sehr heterogen mit verschiedenen Fahrzeugtypen, die - jeweils typenrein - in unterschiedlichen Mehrfachtraktionen einsetzbar sind. In anderen Netzen wie beispielsweise der S-Bahn München ist der Fahrzeugpark sehr homogen. Hier bietet sich als einzige Differenzierung die Wahl zwischen Einfach-, Doppel- und Dreifachtraktion, wovon auch Gebrauch gemacht wird. In Paris ist der Fahrzeugpark auf der RER-Linie A zwar heterogen, allerdings erfolgt der Fahrzeugeinsatz auf den einzelnen Streckenästen bezogen auf das Platzangebot jeweils relativ gleichartig. Ferner wird in diesem Netz

[460] Vgl. Tabelle 5.1.4.

auf den beiden anderen betrachteten Linien jeweils genau eine Baureihe in Doppeltraktion eingesetzt, so dass dort gar keine Varianz vorliegt.

Bei der Betrachtung der Erlöse und Kosten zeigen die Netze mit Doppelstockzügen, die ein vergleichsweise großes Sitzplatzangebot aufweisen, im Vergleich mit der gewählten Methodik höhere Erlöse sowie niedrigere Energiebedarfe pro Sitzplatz. In den Kosten pro Zugkilometer liegen diese Fahrzeuge jedoch im oberen Bereich, was u. a. durch das höhere Fahrzeuggewicht begründet ist.

Schlussendlich bei der Betrachtung sämtlicher Aspekte sind übergreifende Muster über alle Netze schwer erkennbar. Betrachtet man in den Netzen jeweils einzelne Streckenäste, sind eher Gemeinsamkeiten erkennbar. So dominiert dort, wo Expresszüge zum Einsatz kommen, der *Zonenbetrieb*. Viele Ausprägungen sind jedoch eher historisch gewachsen bzw. in der Vergangenheit durch Annahmen wie beispielsweise in Berlin bei der Sicherungstechnik festgelegt und damit schwer änderbar worden.

6. Fazit, Schlussfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Beschreibungmethodik für differenzierte Linienverkehre am Beispiel von Schnellbahnbetrieben in Ballungsräumen entwickelt.

Im Mittelpunkt der erarbeiteten Beschreibung steht die Differenzierung des Linienverkehrs in Spitzenzeiten mit Fokus auf Schnellbahnverkehre in Ballungsräumen.[461] Sie beschreibt mit unterschiedlichen Schwerpunkten den (wirtschaftlichen) Aufwand, den verkehrlichen Nutzen und die betrieblichen Herausforderungen dieser beschleunigten Angebote des Linienverkehrs. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den Kapazitätserhöhungen in Spitzenzeiten, die in den einzelnen Netzen unterschiedlich stark ausgeprägt ist, teilweise gar nicht vorhanden und teilweise sehr bedeutsam ist. Die Analyse zeigt viele Gemeinsamkeiten in den betrachteten Netzen, aber auch viele Unterschiede zwischen den im Kern ähnlichen Systemen.

Die Wahl der Beschreibungsparameter ist zunächst durch die Datenverfügbarkeit gelenkt worden. Mit zunehmender Beschäftigung mit dem Thema wird jedoch klar, dass bei vollständigem Verzicht auf unternehmerisch geschützte Daten der Vorteil entsteht, die Methodik auf andere Netze anwenden zu können, da die gewählten Daten in der Regel frei verfügbar sind.

Die erarbeiteten Skripte machen eine Analyse für beliebige andere Netze sehr leicht, da der Weg vom Import bis zum Ergebnis in Form von Diagrammen je nach Netzgröße und Rechenleistung in wenigen Minuten erfolgen kann - für sämtliche Parameter mit der stets gleichen Berechnungsmethode. Die für die Beschreibungsparameter zu ermittelnden Absolutwerte wie beispielsweise Anzahl Abfahrten pro Stunde, Entfernungen, Fahrtdauern und -längen sowie Stationshalte liegen in der Datenbank vor und können als Basis für weitere verkehrliche oder betriebliche Auswertungen Verwendung finden. Heutige Rechenkapazitäten machen es möglich, mit geringem Aufwand noch deutlich größere Datengrundlagen zu erfassen und mit der erarbeiteten Methodik auszuwerten. Damit lässt sich auch der Detaillierungsgrad der Beschreibung weiter verfeinern durch tiefer gehende Untersuchung der einzelnen Aspekte. Dies kann modular erfolgen durch den Austausch der entsprechenden Berechnungsabschnitte im Skript. Es erfordert jedoch weitere Datengrundlagen und ist damit an deren Zugänglichkeit geknüpft.

[461] Vgl. die gestellte Forschungsfrage in Abschnitt 4 auf Seite 3.

Damit ergäbe sich jedoch der Vorzug, einige hier getroffene Annahmen durch noch bessere Daten zu ersetzen. Beispielsweise könnten die reale Nachfrage anstelle des Sitzplatzangebotes oder die ausgenutzte Streckenkapazität anstelle der getrennten Erhebung der Anzahl an Zugfahrten pro Gleis sowie des Zugbeeinflussungssystems und der Stationsabstände verwendet werden. Insbesondere in der wirtschaftlichen Beschreibung ließe sich mit den Kosten der realen Fahrzeuge anstelle der verwendeten generischen Referenzfahrzeuge sowie den realen Erlösen anstelle der aus dem Sitzplatzangebot abgeleiteten Durchschnittserlöse eine höhere Präzision erreichen.

Einige inhaltliche Gemeinsamkeiten lassen sich zusammenfassend festhalten. Diese liegen einerseits in der Netzstruktur (Lage von Zwischenendstellen, Netzausdehnung in den klassischen Netzen) und der Infrastruktur (Zweigleisigkeit, maximale Anzahl an Zugfahrten pro Stunde). Die Existenz von (abschnittsweisen) Expresszügen steht nicht in Zusammenhang mit der Netzausdehnung und der Angebotsdichte. Sowohl die Netze mit sehr schwach befahrenen Außenabschnitten als auch jene mit sehr dichtem Angebot machen von dieser Differenzierungsform Gebrauch. In allen Netzen gibt es Abschnitte, auf denen die Zahl der Zugfahrten in der HVZ nicht erhöht wird. Es gibt jedoch Netze wie Kopenhagen, auf denen überall mindestens durch längere Züge das Angebot verdichtet wird.

Die entstandene Beschreibungsform, deren Erarbeitung auf einer breiten Literaturbasis steht, bietet damit den Ausgangspunkt weiterer tiefer gehender Arbeiten und Vergleiche. Die gewählte Skalierung macht unabhängig von Absolutwerten. Damit werden Größenunterschiede nivelliert. Die erarbeitete Methodik ist auch auf einzelne Korridore übertragbar. Erkenntnisse sind jedoch nur miteinander vergleichbar, wenn - wie in den gezeigten Fallstudien - eine gemeinsame Skala verwendet wird. Zwei getrennte Betrachtungen führen zu unterschiedlicher Skalierung und sind damit nicht vergleichbar. Bei Nutzung der Methodik zur Beschreibung bzw. zum Vergleich kleiner Netze oder einzelner Korridore ist jedoch zu beachten, dass die Aussagekraft des Median schwächer wird.

Die Arbeit liefert mit den Polardiagrammen eine Darstellung, die einen Grad der Differenzierung bzw. Ausprägung der einzelnen Aspekte für jedes Netz sowie nebeneinander gestellt im Vergleich mit den übrigen Netzen andeutet. Um diesen tatsächlich als Vergleichsgröße zu bestimmen, bräuchte es eine weitergehende gegenseitige Gewichtung der einzelnen Beschreibungsparameter, da in der vorliegenden Beschreibungsdarstellung alle Aspekte ungewichtet nebeneinander stehen.

In der vorliegenden Arbeit wird die Methodik auf sieben existierende Systeme mit real umgesetzten Angebots- und Betriebskonzepten angewendet. Sie kann in der Planungspraxis jedoch ebenso verwendet werden zur vergleichenden Betrachtung zukünftiger Konzepte. Auch können

unterschiedliche Teile desselben Netzes miteinander verglichen werden, beispielsweise zur Darstellung von Unterschieden in der Angebotsdichte. Wenngleich die Differenzierung durch (abschnittsweise) Expressfahrten das Auswahlkriterium der betrachteten Fallstudien war, bieten bereits die gewählten Parameter eine Basis für die Beschreibung beliebiger Netze des öffentlichen Personenverkehrs.

Die breite Streuung der Beschreibungsparameter deckt die drei wesentlichen Bereiche der Verkehrssysteme ab: Der verkehrliche Teil hat den Blick auf den Fahrgast. Die Produktion des Angebotes wird durch die betriebliche Sicht abgedeckt. Die für das Unternehmen - und volkswirtschaftlich bei öffentlich finanzierten Verkehren - wichtige Wirtschaftlichkeit bildet die dritte Säule der Beschreibung. Derart fein unterteilt fallen die eingangs genannten Randbedingungen und Einschränkungen weniger stark ins Gewicht. Es handelt sich bei der erarbeiteten Vergleichs- und Beschreibungsmethodik nicht um einen Vergleich von *Äpfeln und Birnen* - weder im Vergleich ganzer Netze noch einzelner Korridore oder Strecken.

Literaturverzeichnis

Aalb 2008

Aalborg University (Veranst.): *Fremtidens S-bane i København.* Aalborg, August 2008 . – ISSN 1603–9696

Ahlbrecht u. a. 1997

Ahlbrecht, Hans ; Albert, Holger ; Bihn, Friedhelm ; Bonz, Manfred ; Bruns, Winfried ; Daubertshäuser, Klaus ; Dubrowsky, Dietrich ; König, Herbert ; Löcker, Gerhard ; Ludwig, Dieter ; Mallikat, Jürgen ; Meyer, Wolfgang ; Montada, Manfred ; Nickel, Bernhard E. ; Pütz, Ralph ; Rogat, Ulrich ; Wergles, Klaus ; Müller-Hellmann, Adolf ; Blennermann, Friedhelm ; Girnau, Günter ; Blennermann, Friedhelm (Hrsg.) ; Müller-Hellmann, Adolf (Hrsg.) ; Girnau, Günter (Hrsg.): *Zukunftsfähige Mobilität - Menschen bewegen; ÖPNV in Deutschland.* Düsseldorf : Alba Fachverlag, 1997. – ISBN 978–3–87094–746–0

Albrecht u. a. 2003

Albrecht, Thomas ; Oettich, S. ; Scholz, Sven: Die Möglichkeiten und Grenzen einer nachfrageorientierten Flexibilisierung des Beförderungsangebotes von S-Bahnen - Ergebnisse der Fallstudie von Intermobil Region Dresden. In: *19. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden.* Dresden, September 2003

Albrecht u. Scholz 2006

Albrecht, Thomas ; Scholz, Sven: Nachfrageorientierte Optimierung von Systemgestaltung und Angebotsplanung im S-Bahn-Betrieb. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 59 (2006), Nr. 4, S. 225–232. – ISSN 0013–2845

Altmann u. a. 2004

Altmann, Andreas ; Bockholt, Thorge ; Burkert, Raimund ; Dutsch, Steffen ; Fiedler, Joachim ; Grunow, Volker ; Herbold, Jürgen ; Hilpert, Thomas ; Kindinger, Christian ; Knoppik, Johannes ; Korn, Joachim ; Ludwig, Axel ; Misslitz, Michael ;

Morel, Oliver ; Panitz, Peter ; Schliebener, Melanie ; Wendt, Michael: Verlässliche Bedienung im öffentlichen Personenverkehr / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln, 2004 (64). – FGSV-Arbeitspapier

Apel u. Hornemann 2011

Apel, Norbert ; Hornemann, Klaus: ZBS - Das neue Zugbeeinflussungssystem für die Berliner S-Bahn vor der Praxiseinführung. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 64 (2011), Nr. 06, S. 37–41. – ISSN 0013–2845

Bauer u. Eilers 1993

Bauer, Wolfgang ; Eilers, Fritz: Der Betrieb der S-Bahn Stuttgart von 1978 bis 1993. In: *Die Bundesbahn* (1993), Nr. 4, S. 311–316. – ISSN 0007–5876

Baumgartner 2001

Baumgartner, J. P.: Prices and Cost in the Railway Sector / Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne. Lausanne, 2001. – Paper

Beck 2013

Beck, Michael J.: Industrialisierung der Fahrplanung bei der DB Netz AG / IT13.Rail. Zürich, Januar 2013. – Folienvortrag

Bente u. Roeleveld 2006

Bente, Heiner ; Roeleveld, Adriaan: Benchmarking identifies good practice in rolling stock maintenance. In: *Railway Gazette International* 162 (2006), April, Nr. 4, S. 224–226. – ISSN 0373–5346

Bertard 2013

Bertard, Thomas: *Methodik zur Optimierung von Angeboten im Schienenpersonenfernverkehr am Beispiel Frankreich*, Technische Universität Berlin, Diss., 2013

Bertschmann u. a. 2013

Bertschmann, Damaris ; Doll, Claus ; Dünnebeil, Frank ; Hartwig, Johannes ; Knörr, Wolfram ; Lambrecht, Udo ; Maibach, Markus ; Schade, Wolfgang ; Senger, Florian ; Sutter, Daniel: Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Maßnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr. In: *Umweltbundesamt* (2013), Nr. 11. – ISSN 1862–4804. – Dessau-Roßlau

Bickel u. a. 2006

Bickel, Peter ; Burgess, Arnaud ; De Jong, Gerard ; Fagiani, Patrizia ; Friedrich, Rainer ; Hunt, Alistair ; Laird, James ; Lieb, Christoph ; Lindberg, Gunnar ; Mackie, Peter ; Navrud, Stale ; Odgaard, Thomas ; Ricci, Andrea ; Shires, Jeremy ; Tavasszy,

Lori: Proposal for Harmonised Guidelines / Institut für Energiewissenschaft und Rationelle Energieanwendung. Stuttgart, Februar 2006 (5). – Deliverable. – Contract-Nr FP6-2002-SSP-1/502481

Bihn u. a. 2000

Bihn, Friedhelm ; Karopka, Hans-Joachim ; ler, Birgit M. ; Oppel, Thomas: Wie erlebt der Kunde den öffentlichen Nahverkehr? In: *Der Nahverkehr* 18 (2000), Nr. 11, S. 18–22. – ISSN 0722–8287

Binder u. a. 2013

Binder, Stefan ; Frisch, Christian ; Krautter, Manuel ; Mäder, Philipp: Die Rollmaterialstrategie der Sbb für den Personenverkehr. In: *Eisenbahn-Revue International* 20 (2013), Juli, Nr. 07, S. 337–341. – ISSN 1421–2811

Birn u. a. 2010

Birn, Kristina ; Mann, Hans-Ulrich ; Pohl, Michael: Überprüfung des Bedarfsplans für die Bundesschienenwege / Beratergruppe Verkehr und Umwelt GmbH, Intraplan Consult GmbH. Freiburg/ München, November 2010. – Abschlussbericht

Blier 1993

Blier, Gérard: *Nouvelle géographie ferroviaire de la France*. Bd. Tome II: *L'organisation régionale du trafic*. Paris : Editions La Vie du Rail, 1993. – ISBN 978–2–902808–43–4

Blome 2007

Blome, Christian: *Vergleich und Untersuchung der Übertragbarkeit des Pariser RER-Bedienungskonzepts auf Berliner Verhältnisse am Beispiel der S-Bahn-Linie S5*. Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Diplomarbeit, Dezember 2007

Blum u. a. 2012

Blum, Salem ; Brunn, T. v. ; Bruns, F. ; Chaumet, R. ; Erismann, Benno: Gesamtwirtschaftliche Nutzen einer S-Bahn FL.A.CH für das Fürstentum Liechtenstein / Tiefbauamt Fürstentum Liechtenstein. Vaduz (LI), April 2012. – Schlussbericht

Bölke u. a. 2003

Bölke, Michael ; Denzin, Pia ; Huckestein, Burkhard ; Specht, Bernhard: Konzeption zur Finanzierung eines umweltverträglichen öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) / Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, Juni 2003. – Diskussionspapier

Boltze u. Kittler 2011

Boltze, Manfred ; Kittler, Wolfgang: Beeinflussung der Zeitwahl von Nutzern des OPNV. In: *Der Nahverkehr* 29 (2011), Nr. 2011-06, S. 2–7. – ISSN 0722–8287

Bosserhoff 2005

Bosserhoff, Dietmar: Untersuchungen zum regionalen Schienenverkehr. In: *Der Nahverkehr* 23 (2005), Nr. 1+2, S. 20–27. – ISSN 0722–8287

Brühwiler u. a. 2015

Brühwiler, Dominik ; Rey, Georges ; Schurter, Werner ; Weiss, Theo: 25 Jahre Zürcher S-Bahn - Entwicklung von Angebot und Nachfrage. In: *Eisenbahn-Revue International* 22 (2015), Nr. 6, S. 284–293. – ISSN 1421–2811

Bunge 2011

Bunge, Stephan: *Analyse und Bewertung der regionalen Erschließungsqualität im Schienenpersonenfernverkehr*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2011. – Auch veröffentlicht bei DVV Media Group (ISBN 978-3-7771-0432-4)

Butzbach 2005a

Butzbach, Volker: Das Trassenpreissystem der DB Netz AG - Die Trassenprodukte. In: *Deine Bahn* 33 (2005), Februar, Nr. 2, S. 114–118. – ISSN 0948–7263

Butzbach 2005b

Butzbach, Volker: Das Trassenpreissystem der DB Netz AG - Die Zu- und Abschläge des Trassenpreissystems. In: *Deine Bahn* 33 (2005), März, Nr. 3, S. 178–183. – ISSN 0948–7263

Butzbach 2010

Butzbach, Volker: Richtlinie 402.0203 - Planungsprocedere - Aufgaben und Abläufe im Planungsprocedere für den Netzfahrplan / Deutsche Bahn AG. Frankfurt am Main, April 2010. – Richtlinie

Caltrain 2011

Caltrain: Caltrain Timetable - Effective July 1, 2011 / Caltrain Regional Rail Link. San Carlos, Juli 2011. – Fahrplantabelle

Canis u. Koch 2003

Canis, Christian ; Koch, Sebastian: *Qualitätsverbesserung Öffentlicher Verkehrsmittel Durch Einführung Intrinsischer Komponenten Der Verkehrsmobilität*. Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, Studienarbeit, 2003

Cosandey u. Kohler 2012

Cosandey, Eric ; Kohler, Florian: *Can a Paths Catalogue in European High-Speed Rail Operations enhance Competition?*, University of Zurich, Executive MBA, Diplomarbeit, 2012

Dahl u. a. 2016

Dahl, Alexander ; Kindl, Annette ; Mann, Hans-Ulrich ; Paufler-Mann, Daniela ; Röhling, Wolfgang ; Roos, Alexandra ; Walther, Christoph ; Wassmuth, Volker ; Weinstock, Fabian: Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030 / PTV, TCI Röhling, Hans-Ulrich Mann. Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München, März 2016. – Handbuch

d'Alençon 2011

d'Alençon, Paola A.: *The production of urban space through mobility - The case of the Stadtbahn in Berlin.* Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2011

Dasburg 2008

Dasburg, Nathaly: Costs and performance of European rail freight transportation / Nea Transport research and training. Zoetermeer, (NL), Juli 2008. – Paper

DB Netz AG 2011

DB Netz AG: Trassenpreissystem (TPS) - Liste der Entgelte der DB Netz AG 2012 für Trassen, Zusatz- und Nebenleistungen / DB Netz AG, Preise und Produkte. Frankfurt am Main, 2011. – Liste der Entgelte

DE-Consult 1996

DE-Consult: Betriebskonzept S-Bahn Berlin - Technologische Realisierbarkeit von Expreß-S-Bahn-Angeboten (Zwischenbericht) / DE-Consult. Berlin, 1996. – Abschlussbericht

Debièvre u. a. 2009

Debièvre, Antoine ; Polge, Christian ; Prigent, Anne ; Viala, Steve: Modernisation de la ligne B du RER - Nouvelle étape de la suppression de la relève des conducteurs / RATP und SNCF. Paris, 2009. – Pressemitteilung

Delvendahl 1964

Delvendahl, Heinz: Über die Gestaltung der Bahnanlagen für den Nahverkehr der Deutschen Bundesbahn. In: *Die Bundesbahn* 38 (1964), Nr. 19-20, S. 698–702. – ISSN 0007–5876

Demuth 2004

Demuth, Nina: *Der ICE als Pendler- und Vorortzug?* Trier, Fachbereich VI - Geographie/Geowissenschaften, Universität Trier, Diplomarbeit, 2004

Dettenbach 2013

Dettenbach, Jörg: Intelligente Fahrgastinformation - Wann kommt die Bahn? In: *Verkehr und Technik* 66 (2013), Januar, Nr. 1, S. 23–25. – ISSN 0340–4536

Deutsche Bahn AG 2011

Deutsche Bahn AG: *Elektronisches Kursbuch, Jahresfahrplan 2012*. Nur online abrufbar bis Dezember 2012. `http://kursbuch.bahn.de`. Version: Dezember 2011

Deutsche Bahn AG 2015

Deutsche Bahn AG: *Elektronisches Kursbuch, Jahresfahrplan 2016*. Nur online abrufbar bis Dezember 2016. `http://kursbuch.bahn.de/`. Version: Dezember 2015

Dicke-Ogenia u. Dziekan 2010

Dicke-Ogenia, Matthijs ; Dziekan, Katrin: Reducing uncertainty and supporting cognitive maps in travel information for public transport. In: *World Review of Intermodal Transportation Research* 3 (2010), Nr. 1-2, S. 73–90. `http://dx.doi.org/10.1504/WRITR.2010.03158`. – DOI 10.1504/WRITR.2010.03158. – ISSN 1749–4729

Dilba u. Künzel 2011

Dilba, Alexander ; Künzel, Martin: *Optimierungs- und Weiterentwicklungspotential des S-Bahn- und Regionalverkehrs im Raum Dresden unter Einsatz von Simulationssoftware*. Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Studienarbeit, November 2011

Dix u. Staimer 2007

Dix, Karl-Heinz ; Staimer, Horst: *Die Münchner S-Bahn - Vom Dampfzug zum 10-Minuten-Takt*. München : DiSt-Verlag, 2007. – ISBN 978–3–9811659–0–6

Dupin u. a. 2007

Dupin, Antoine ; Février, Philippe ; Taté, Dimitri ; Pepinster, Julian: *Métro-RER: une histoire, un avenir*. Paris : Editions Little Big Man, 2007. – ISBN 978–2–9153–4752–4

Dziekan 2008a

Dziekan, Katrin: *Ease-of-Use in Public Transportation - A User Perspective on Information and Orientation Aspects*. Stockholm, Royal Institute of Technology (KTH), Dissertation, 2008

Dziekan 2008b

Dziekan, Katrin: What do people know about their public transport options? In: *Transportation* 35 (2008), Nr. 4, S. 519–538. `http://dx.doi.org/10.1007/s11116-008-9164-x`. – DOI 10.1007/s11116–008–9164–x. – ISSN 0049–4488. – 10.1007/s11116-008-9164-x

Dziekan u. Kottenhoff 2007

Dziekan, Katrin ; Kottenhoff, Karl: Dynamic at-stop real-time information displays for public transport: effects on customers. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 41 (2007), Nr. 6, S. 489–501. – ISSN 0965–8564

Dziekan u. Ruhrort 2010

Dziekan, Katrin ; Ruhrort, Lisa: Design für Alle als zentraler Gestaltungsaspekt im ÖPNV. In: *Der Nahverkehr* 28 (2010), Dezember, Nr. 12, S. 12–19. – ISSN 0722–8287

Ebersbach 1975

Ebersbach: Das Netz der Pariser Expreßmetro wächst zusammen. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (1975), Nr. 1975-24, S. 389. – ISSN 0013–2845

Elliott u. Lipfert 2012

Elliott, Dave ; Lipfert, Bill: Caltrain/ California HSR Blended Operations Analysis / LTK Engineering Services. 2012. – Abschlussbericht

Emde 2012

Emde, Armin: *Auswirkungen differenzierter Halteregime auf die Streckenkapazität.* Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Masterarbeit, 2012

Ende 1970

Ende, Michael: *Jim Knopf und Lukas, der Lokomotivführer.* 13. Auflage. Stuttgart : Thienemann, 1970. – ISBN 978–3–522–10190–5

Eskenazi 2010

Eskenazi, Joe: Transit Experts - Caltrains Future Grim. In: *San Francisco Weekly Newspaper* (2010), April. – ISSN 1060–2526. – Ausgabe vom 6. April 2016

Etzold u. Schröter 2006

Etzold, Paavo ; Schröter, Reinhold: Beschreibung von Verkehrssystemen. In: *Der Nahverkehr* 24 (2006), September, Nr. 9, S. 36–42. – ISSN 0722–8287

Fassbinder 2011

Fassbinder, Stefan: Energieeffizienz im Schienenverkehr, Teil 2 - Elektrische Zugförderung und Zukunftskonzepte. In: *Elektropraktiker* (2011), Nr. 2011-02, S. 131–135

Felder u. Weirauch 2012

Felder, Gabriela ; Weirauch, Janin ; Franz, Hans-Werner (Hrsg.): 360° Qualität - Qualitätsbilanz 2011 im Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg inklusive Berichtspflichten nach EU-Verordnung 1370 / Verkehrsverbund Berlin Brandenburg. Berlin, 2012. – Berichtband

Fioc 1964

Fioc, Albert: Die schienengebundenen Verkehrsmittel im Pariser Raum. In: Grassmann, Ewald (Hrsg.) ; Technische Universität Berlin (Veranst.): *Planung Bau und Betrieb des Schnellverkehrs Ballungsräumen* Technische Universität Berlin, Bauverlag GmbH, November 1964, S. 53–78

Flemming 1977

Flemming, Günther: *Das Verkehrswesen im Gefüge unserer Wirtschaft.* Stuttgart : Deutscher Sparkassenverlag, 1977 (Informationsdienst der Sparkassen und Landesbanken / Girozentralen). – Bestellnummer 310344

Frank u. a. 2012

Frank, Patrick ; Moll, Stephan ; Pumasoli, Tobias ; Weidmann, Ulrich: Synthese. In: *Optimale Netznutzung und Wirksamkeit der Instrumente zu deren Lenkung.* Zürich : Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Juni 2012 (Schriftenreihe Institut fiir Verkehrsplanung und Transportsysteme 158). – ISBN 978–3–905826–22–7, Forschungsbericht TP7, S. 1–174

Frederiksen u. a. 2005

Frederiksen, Rasmus D. ; Nielsen, Otto A. ; Seest, Elsebet: Opgørelse af passagerregularitet i S-tog. In: *Annual Transport Conference at Aalborg University 2005.* Aalborg, 2005. – ISSN 1397–3169

Friedrich 2017

Friedrich, Johannes: *Einfluss von Preissystemen auf die Verbindungsauswahl im Eisenbahnfernverkehr.* Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2017

Fröhlich u. Vrtic 2006

Fröhlich, Philipp ; Vrtic, Milenko: Was beeinflusst die Wahl der Verkehrsmittel? In: *Der Nahverkehr* 24 (2006), April, Nr. 4, S. 52–57. – ISSN 0722–8287. – Arbeitsbericht 363

Garstenauer 2005

Garstenauer, Klaus: Entwicklungstendenzen beim InfrastrukturBenützungsentgelt der Österreichischen Bundesbahnen. In: *ZEVrail Glasers Annalen* 129 (2005), Nr. 5, S. 182–187. – ISSN 1618–8330

Gerondeau 2003

Gerondeau, Christian: *La Saga du RER.* Paris : Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 2003. – ISBN 978–2–85978–368–6

Geschwinder u. Göbler 2008

Geschwinder, Klaus ; Göbler, Tanja ; Hannover, Region (Hrsg.): Nahverkehrsplan 2008 / Region Hannover, Fachbereich Verkehr. Hannover, November 2008. – Textband

Geyer 2014

Geyer, Thomas: Die Zukunft des Schienenpersonen(nah)verkehrs / Mobil im echten Norden - Nahverkehrskongress Kiel. 2014. – Folienvortrag

Gladigau 1992

Gladigau, Rüttger: Energiesparen im S-Bahn-Verkehr. In: *Die Bundesbahn* 66 (1992), Nr. 12, S. 1362–1365. – ISSN 0007–5876

Götz u. a. 1968

Götz, Günter ; Borghardt, Heinz ; Driebe, Günter ; Kahle, Heinz ; Stegemann, Wilhelm: *Die Berliner S-Bahn*. Berlin : Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1968. – VLN 162 - 925/21/68

Graßmann 1964a

In: Grassmann, Ewald: *Fahrdynamische Erfordernisse für den Nahschnellverkehr von Schienenbahnen*. Berlin : Technische Universität Berlin, 1964 (Planung Bau und Betrieb des Schnellverkehrs in Ballungsräumen), S. 123–146

Graßmann 1964b

Grassmann, Ewald: Der moderne Nahschnellverkehr. In: *Die Bundesbahn* 38 (1964), Nr. 19-20, S. 681–691. – ISSN 0007–5876

Graßmann 1969

Grassmann, Ewald: Systemfragen des spurgebundenen Nahschnellverkehrs und der heutige Stand der Entwicklung in In- und Ausland. In: *Planung, Bau und Betrieb des Schnellverkehrs in Ballungsräumen*. Berlin : F. Höpfner, März 1969 (Schnellverkehrstagung Berlin), S. 9–38

Große 2003

Grosse, Christine: *Verkehrsabhängige Betriebsführung bei Stadtschnellbahnen*, Technische Universität Berlin, Dissertation, August 2003

Grossen u. Isenmann 2007

Grossen, Werner ; Isenmann, Thomas: Diskriminierungsfreie Trassenvergabe / Trasse Schweiz AG. Bern, 2007. – Paper

Grunberg 2003

Grunberg, Bastian ; Meffert, Heribert (Hrsg.) ; Backhaus, Klaus (Hrsg.): Zeitverwendung als Nutzenkomponente von Verkehrsdienstleistungen - dargestellt am Beispiel der Deutschen Bahn AG / Wissenschaftliche Gesellschaft für Marketing und Unternehmensführung e.V. Münster(Westf), 2003 (168). – Arbeitspapier

Güttner 2006

Güttner, Axel ; DB Netz AG (Hrsg.): Ril 432 - Sonderbestimmungen für den Betrieb der Berliner S-Bahn / Deutsche Bahn AG. Frankfurt am Main, Dezember 2006. – Richtlinie

Hauswald 2009

Hauswald, Tobias: *Technisch-wirtschaftliche Bewertung von Bahnprojekten des Hochgeschwindigkeitsverkehrs.* Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2009. `http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-2345`. – DOI 10.14279/depositonce–2345

Hecht 2011

Hecht, Markus: Energieeffizienz und Treibhausgasemission des Verkehrs im Hinblick auf den Schienenverkehr. In: *TU international: Zeitschrift für internationale Absolventen der Technischen Universität Berlin* 67 (2011), Januar, Nr. 1, S. 11–13. – ISSN 0935–2740

Heinrich 2014

Heinrich, Arvid: *Nachfragepotenziale hierarchischer Angebotskonzepte im Netz der Berliner S-Bahn.* Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Masterarbeit, 2014

Heinrich 1970

Heinrich, Klaus: *Ein neues Personenverkehrs-System mit Fern-S-Bahnen.* Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, Juli 1970

Heinze 1979

Heinze, G. Wolfgang: Verkehr schafft Verkehr. In: *Berichte zur Raumforschung und Raumplanung (Wien)* Jg. 23 (1979), Nr. Heft 4/5, S. 9–32

Heinze 2004

Heinze, G. Wolfgang: Innovation und Evolution von Verkehrssystemen / Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, Technische Universität Berlin. Berlin, 2004 (Sommersemester 2004). – Vorlesungsskript

Heinze 2006

Heinze, G. Wolfgang: Durchsetzung neuer Verkehrssysteme / Fachgebiet Verkehrssystem-

planung und Verkehrstelematik, Technische Universität Berlin. Berlin, 2006 (Wintersemester 2006/2007). – Vorlesungsskript

Heinze u. Kill 1988

In: Heinze, G. Wolfgang ; Kill, Heinrich H.: *The Development of the German Railroad System*. Frankfurt am Main, Boulder (Colorado) : Campus, Westview Press, 1988. – ISBN 978–3–593–34032–6, S. 105–134

Höhnscheid u. Müller-Hellmann 2007

Höhnscheid, Heike ; Müller-Hellmann, Adolf: Im Mittelpunkt der Kunde - Überlegungen zu Kundenbeziehungen im Schienenpersonennahverkehr. In: *ZEVrail Glasers Annalen* 131 (2007), Januar, Nr. 1-2, S. 28–33. – ISSN 1618–8330

Holley u. a. 2007

Holley, David ; Jain, Juliet ; Lyons, Glenn: The use of travel time by rail passengers in Great Britain. In: *Transportation Research Part A* (2007), Nr. 41, S. 107–120. `http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2006.05.012`. – DOI 10.1016/j.tra.2006.05.012. – ISSN 0965–8564

Hornemann 2006

Hornemann, Klaus: Linienzugbeeinflussung bei der S-Bahn München. In: *Eisenbahn-Revue International* 13 (2006), Juni, Nr. 6, S. 306–311. – ISSN 1421–2811

Hörstel u. a. 1993a

Hörstel, Jürgen ; Jäkel, Harald ; Schroeder-Baumgart, Reinhart ; Knobloch, Axel von: Expreßzugsysteme bei Stadtschnellbahnen. In: *Der Nahverkehr* 11 (1993), Oktober, Nr. 10, S. 16–21. – ISSN 0722–8287

Hörstel u. a. 1993b

Hörstel, Jürgen ; Klahn, Volker ; Wegel, Helmut: Planung eines sehr schnellen Güterverkehrs auf der Schnellfahrstrecke Hannover-Wü rzburg. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 42 (1993), Januar, Nr. 1-2, S. 79–85. – ISSN 0013–2845

Huber u. Warninghoff 2012

Huber, Hans-Peter ; Warninghoff, Carsten-Rainer: Revision der internationalen Kapazitätsrichtlinie UIC-Merkblatt 406 -Kapazität-. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 65 (2012), Nr. 2012-10, S. 0048–0051. – ISSN 0013–2845

Hubert 2009

Hubert, Alexander: *Analyse der statistischen Abhängigkeit zwischen Pünktlichkeit und*

Verspätungsminuten und deren Regionalisierung. Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Diplomarbeit, 2009

Iffländer 2013

Iffländer, Lukas: Pro Bahn zum Franken-Thüringen-Express Analysen und Vorschläge / Fahrgastverband Pro Bahn, Landesverband Bayern. 2013. – Konzeptpapier

Ilgmann 2003

Ilgmann, Gottfried: Bahnreform - Ziel verfehlt. In: *Bahn-Report* (2003), März, Nr. 3, S. 8–11. – ISSN 0178–4528

I.SVP 2010

I.SVP: Das Stationspreissystems 2011 - SPS 11 / DB Station und Service AG. Berlin, Dezember 2010. – Folienpräsentation

Janicki 2014

Janicki, Jürgen: Elektrischer Zugbetrieb. In: *Deine Bahn* 42 (2014), Nr. 9, S. 17–22. – ISSN 0948–7263

Janssen u. Lehnhoff 2003

Janssen, Solveigh ; Lehnhoff, Nicola: Abschätzung der Haltestellenaufenthaltszeiten im Nahverkehr. In: *19. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden.* Dresden, September 2003

Joest u. Küsters 1984

Joest, Lothar ; Küsters, Heribert: Betriebsplanung und Betriebsführung bei der S-Bahn im Ruhrgebiet unter besonderer Berücksichtigung des östlichen Bereichs. In: *Die Bundesbahn* 58 (1984), Nr. 5, S. 337–342. – ISSN 0007–5876

Juhnke 1966a

Juhnke, Klaus-Jürgen ; Voigt, Fritz (Hrsg.): *Schriftenreihe des Instituts für Industrie- und Verkehrspolitik der Universität Bonn.* Bd. 14: *Die Bedeutung und Gestaltung der Eisenbahnen für den Personenverkehr in Ballungsräumen.* Berlin : Duncker & Humblot, 1966

Juhnke 1966b

Kapitel I. In: Juhnke, Klaus-Jürgen: *Schriftenreihe des Instituts für Industrie- und Verkehrspolitik der Universität Bonn.* Bd. 14: *Das Beispiel Paris.* Berlin : Duncker & Humblot, 1966, S. 92–95

Juhnke 1966c

In: Juhnke, Klaus-Jürgen: *Schriftenreihe des Instituts für Industrie- und Verkehrspolitik der Universität Bonn.* Bd. 14: *An Nachfrageschwankungen - Tägliche Schwankungen.* Berlin : Duncker & Humblot, 1966, S. 200–215

Julitz 1998

Julitz, Lothar: *Bestandsaufnahme Deutsche Bahn: das Abenteuer einer Privatisierung.* Frankfurt am Main : Eichborn Verlag, 1998. – ISBN 978–3–8218–1476–6

Kaas u. a. 2006

Kaas, Anders H. ; Landex, Alex ; Schittenhelm, Bernd ; Schneider-Tilli, Jan: Evaluation of railway capacity. In: *Annual Transport Conference at Aalborg University 2006.* Aalborg, 2006. – ISSN 1397–3169

Kirfel u. Recker 2010

Kirfel, Alexander ; Recker, Engelbert: Wie die Deutsche Bahn Wettbewerber beim Bahnstrom diskriminiert! / Mofair e.V., Netzwerk Privatbahnen. Berlin, 2010. – Broschüre

Kittler 2010

Kittler, Wolfgang: *Beeinflussung der Zeitwahl von ÖPNV-Nutzern*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2010

Klatt 1980

Klatt, Sigurd: Die Qualität von Verkehrsleistungen. In: *Berliner Sommerseminar 1980* Bd. 6. Berlin : Universitätsbibliothek der Technischen Universität Berlin, 1980 (Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrswegebau). – ISBN 978–3–7983–0754–4, S. 111–134

Klein 2011

Klein, Christian: Ein EVU im Nettovertrag / Westfälische Nahverkehrstage 2011. Hamm(Westf), November 2011. – Folienpräsentation

Klingberg 2004

Klingberg, Werner W.: Takt 10 - Ein Quantensprung bei der Münchner S-Bahn / Deutsche Bahn AG. Berlin, Dezember 2004. – Pressemitteilung

Köttel 2011

Köttel, Brigitta ; Franz, Hans-Werner (Hrsg.): Verbundbericht 2010 / Verkehrsverbund Berlin Brandenburg. Berlin, 2011. – Berichtband

Kottenhoff u. Sundström 2011

Kottenhoff, Karl ; Sundström, Jerker: *Samband mellan körstil och åkkomfort - förbättringspotentialen inom kollektivtrafiken.* KTH, vti/Trafikverket, 2011. – ISBN 978–91–85539–77–2

Krafft-Neuhäuser u. Reinhold 2005

Krafft-Neuhäuser, Heinz ; Reinhold, Tom: Metrobus und Metrotram für den Metropolenverkehr. In: *Der Nahverkehr* 23 (2005), Nr. 7+8, S. 32–38. – ISSN 0722–8287

Kronawitter 2007

Kronawitter, Georg: S2-Ost-Allianz erringt erste Erfolge - Ausbau bleibt auf der Tagesordnung / CSU-Kreisverband München Ost. München, März 2007. – Pressemitteilung

Krönes 1990

Krönes, Gerhard V.: *Aufkommensschwankungen im Personennahverkehr : Verkehrsspitzen und -täler im öffentlichen Personennahverkehr an Werktagen.* München, Universität München, Dissertation, 1990

Kuckuck 1968

Kuckuck, K. H.: Das S-Bahnnetz der Deutschen Bundesbahn - Ein wesentlicher Bestandteil für ein integriertes Massenverkehrssystem im Ruhrgebiet. In: *Planung, Bau und Betrieb des Schnellverkehrs in Ballungsräumen.* Berlin : F. Höpfner, November 1968 (Schnellverkehrstagung Berlin), S. 39–68

Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen mbH 2010

Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen mbH: 2013plus Konzept zum Schienenpersonennahverkehr / Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen mbH. Hannover, 2010. – Langfassung des SPNV-Konzepts

Landex 2007

Landex, Alex: Capacity Statement for Railways. In: *Annual Transport Conference at Aalborg University 2007.* Aalborg, 2007. – ISSN 1903–1092

Lange 2010

Lange, Kirsten: Keine neuen Zuggesichter. In: *fairkehr* (2010), März, Nr. 2010-03. – online abrufbar: http://www.fairkehr-magazin.de/982.html, letzter Zugriff: 23. April 2017

Lehmann 1978

Lehmann, Heinrich: *Bahnsysteme und ihr wirtschaftlicher Betrieb.* Darmstadt : Tetzlaff Verlag GmbH, 1978. – ISBN 978–3–87814–049–8

Lehner 1955

Lehner, Friedrich: Stadtplanung und öffentlicher Nahverkehr. In: *UITP Revue* (1955), Nr. 2/3, S. 169–176, 217–246. – ISSN 0041–5154

Leister 2004

Leister, Hans: Neue Angebote im interregionalen Schienenpersonenverkehr - Was bewegt die Konkurrenz? In: *Informationen zur Raumentwicklung* (2004), Nr. 6, S. 389–394

Leister 2011a

Leister, Hans: Energierückgewinnung beim Bremsen: DB AG bremst Vorteil des elektrischen Verkehrs aus. In: *Eisenbahn-Revue International* 18 (2011), März, Nr. 3, S. 145–149. – ISSN 1421–2811

Leister 2012

Leister, Hans: Bahnstrom: DB Energie will 2013 die Diskriminierung beenden. In: *Eisenbahn-Revue International* 19 (2012), März, Nr. 5, S. 267. – ISSN 1421–2811

Leister 2015

Leister, Hans: Bleibt der DB-Trassenpreis eine 'Schienenverkehrs-Bremse'? In: *Eisenbahn-Revue International* 22 (2015), Januar, Nr. 1, S. 47–51. – ISSN 1421–2811

Leister 2011b

Leister, Ulrich C.: *Development of an Innovative Rail Network Concept for California.* Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Diplomarbeit, April 2011

Linderoos 2009

Linderoos, Mikko: *Attraktivierung des Schienenpersonenverkehrs in Finnland.* Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Bachelorarbeit, 2009

Linderoos 2012

Linderoos, Mikko: *Analyse des Produktionsprozesses eines Eisenbahnverkehrsunternehmens mit dem Fokus auf die Einbindung der Betriebswerkstatt.* Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Masterarbeit, 2012

Loug 1998

Loughborough University (Veranst.): *Review Of Service Quality Valuations.* Loughborough, September 1998 . – ISBN 978–0–86050–314–9

Luethi u. a. 2007

Luethi, Marco ; Nash, Andrew ; Weidmann, Ulrich: Passenger Arrival Rates at Public Transport Stations. In: *86th Annual Meeting of the Transportation Research Board.* Washington D.C., 2007

Lüscher 2014

Lüscher, Regula: Leistungen des S-Bahnverkehrs - Bewilligung des ZBS-Migrationskonzeptes / Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt. Berlin, September 2014. – Bericht an den Hauptausschuss des Abgeordnetenhauses von Berlin. – Drucksache 1362 C

Mahler 2009

Mahler, Stefan: *Der Weg zu einer Ausschreibung der Verkehrsleistung bei der Berliner S-Bahn.* Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Studienarbeit, Februar 2009. http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2010/2547/

Makholm 2012

Makholm, Henning: *Track map A: Copenhagen.* Internetseite. http://dk.trackmap.net/a. Version: Dezember 2012. – Zugriff am 11. November 2013

Maschek 2013

Maschek, Ulrich: Leit- und Sicherungstechnik. In: Fengler, Wolfgang (Hrsg.) ; Fendrich, Lothar (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur.* 2. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978–3–642–30021–9, Kapitel 10, S. 495–552

McKinsey and Company 2010

McKinsey and Company: Zukunftsperspektiven für Mobilität und Transport / DB Mobility Logistics AG, Konzernmarketing. Berlin, 2010. – Studie. – Studie der Deutschen Bahn und McKinsey and Company zum 175-jährigen Jubiläum der Eisenbahn in Deutschland

Meier u. Wörner 1993

Meier, Werner ; Wörner, Wolfgang: Die S-Bahn Stuttgart im Verkehrsverbund von 1978 bis 1993. In: *Die Bundesbahn* (1993), Nr. 4, S. 317–320. – ISSN 0007–5876

Meimbresse u. Michalk 2012

Meimbresse, Bertram ; Michalk, Philip: Development of intermodal train concepts as a method for sustainable regional development. Version: 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-23550-4_12. In: Golinska, Paulina (Hrsg.) ; Hajdul, Marcin (Hrsg.): *Sustainable Transport ? New Trends and Business Practices* Bd. 4. Berlin Heidelberg : Springer, 2012. – DOI 10.1007/978–3–642–23550–4_12. – ISBN 978–3–642–23550–4, S. 273–294

Michalk 2010

Michalk, Philip: *Mit Gewinn auf der Schiene - Eigenwirtschaftlichkeit von Schienenpersonenverkehren in Deutschland.* Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Diplomarbeit, 2010

Michelfelder 1953

Michelfelder, Willy: Verspätungsübertragung bei dichtem Zugverkehr und ihre Auswirkung auf Fahrplan, Streckenleistung und Signaltechnik. In: *Archiv für Eisenbahntechnik* (1953), Nr. 2, S. 29–48

Miller 1956

Miller, George A.: The Magical Number Seven, Plus or Minus Two- Some Limits on our Capacity for Processing Information. In: *Psychological Review* (1956), Nr. 63, S. 81–97. – ISSN 0033–295X

Müer 2011

Müer, Andreas: BVG-Fahrinfo im dritten Jahrzehnt. In: *Verkehr und Technik* 64 (2011), Nr. 10, S. 376–377. – ISSN 0340–4536

Müller 1981

Müller, Hans-Rudolf ; Brändli, Heinrich (Hrsg.): *Fahrplanabhängigkeit des Fahrgastzuflusses zu Haltestellen.* Zürich : Schriftenreihe des Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik der ETH Zürich, IVT-Bericht Nr. 81/5, September 1981

Müller u. a. 2004

Müller, Manfred ; Nieländer, Jochen ; Rothenpieler, Ulrich: DB Netz AG - das Eisenbahninfrastrukturunternehmen. In: *Deine Bahn* 32 (2004), Nr. 2004-10, S. 605–611. – ISSN 0948–7263

o.A. 1994

o.A.: Nutzen-Kosten-Untersuchungen der Schnellbahnlinien U5 und S21 / Intraplan Consult GmbH. 1994. – Bericht

o.A. 2000

o.A.: *Eisenbahnatlas Deutschland.* 2., vollständig neubearbeitete Auflage. Aachen : Schweers + Wall GmbH, 2000. – ISBN 978–3–89494–113–0

o.A. 2003a

o.A.: Geschäftsbericht 2002 / DB Netz AG. Frankfurt am Main, 2003. – Geschäftsbericht

o.A. 2003b

o.A.: Synthèse du schéma directeur de la ligne RER B - Une ambition partagée / Syndicat des transports d Ile-de-France (STIF). Paris, 2003. – Projektbericht

o.A. 2005

o.A.: CDG Express tries a new route. In: *Railway Gazette International* (2005), April, Nr. 04, S. 219. – ISSN 0373–5346

o.A. 2006

o.A.: CDG Expres - Paris en direct - Synthèse des débats / République Française - Ministère des Transports de l'Equipement du Tourisme et de la Mer. 2006. – Synthèse des débats. – Réunion publique de Villepinte le 15 novembre 2006

o.A. 2007a

o.A.: 8-vogns S-tog litra SA til De Danske Statsbaner (DSB) / Siemens AG. Ballerup, 2007. – Informationsbroschüre

o.A. 2007b

o.A.: Diagnostic / Comité de pôle de Noisiel. Noisiel, April 2007. – Präsentation

o.A. 2007c

o.A.: Express-S-Bahn nimmt Probebetrieb auf. In: *merkur-online.de* (2007), September. – Veröffentlicht am 19. September 2007, Zugriff am 24. April 2012

o.A. 2007d

o.A.: S2 wird schneller und geräumiger. In: *merkur-online.de* (2007), Dezember. – Veröffentlicht am 5. Dezember 2007, Zugriff am 24. April 2012

o.A. 2008a

o.A. ; Schwarzenegger, Arnold (Hrsg.) ; Kempton, Will (Hrsg.) ; Bonner, Dale E. (Hrsg.): California State Rail Plan / California Department of Transportation. Sacramento, CA, März 2008. – Entwicklungsplan

o.A. 2008b

o.A. ; S-Bahn Berlin GmbH (Hrsg.): *Dokument FD 562, arbeitender Fahrzeugpark, Jahresfahrplan 2009 (gültig ab 14.12.2008)*. Dezember 2008. – Interne Unterlage

o.A. 2008c

o.A.: Elektronischer Streckenatlas S-Bahn Berlin (ESA-S) / S-Bahn Berlin GmbH. 2008. – Streckenatlas

o.A. 2008d

o.A.: Roll-out des ersten Flirt für Helsinki. In: *Eisenbahn-Revue International* 15 (2008), November, Nr. 11, S. 571–572. – ISSN 1421–2811

o.A. 2009

o.A.: Genehmigung lang laufender Rahmenverträge gemäß Paragraph 14a Abs. 2 AEG (Kundeninformation) / Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. 2009. – Kundeninformation

o.A. 2010a

o.A.: Änderungsvertrag zum Verkehrsvertrag über die Bedienung der Strecken im S-Bahnverkehr der Region Berlin/Brandenburg in den Jahren 2003 bis 2017 / Land Berlin, Land Brandenburg, S-Bahn Berlin GmbH. Berlin, 2010. – Verkehrsvertrag

o.A. 2010b

o.A.: *[M] Lang-, Voll und Kurzzug Verteilung der S-Bahn.* Beiträge der User Froschkönig und Uferlos, 2010. – https://www.eisenbahnforum.de/?act=ST&f=19&t=11628, letzter Zugriff am 10. Juni 2017

o.A. 2011a

o.A.: Les Transports en Commun en Chiffres - Observatoire de la Mobilité en Ile-de-France / omnil. Paris, 2011. – Statistische Zusammenstellung

o.A. 2011b

o.A.: Pressetermin zur Taktverbesserung auf der S2 / Gemeinde Aschheim. Aschheim, April 2011. – Pressemitteilung

o.A. 2011c

o.A. ; Liikennevirasto (Hrsg.): *Rataverkon kuvaus 1.1.2012.* Helsinki : Tuokinprint Oy, 2011 (Liikenneviraston väylätietoja 4). – ISBN 978–952–255–749–0

o.A. 2011d

o.A.: Statistik kommunal 2010 - Markt Schwaben / Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung. 2011. – PDF-Export aus der statistischen Datenbank. – Abrufbar unter www.statistik.bayern.de, Zugriff am 26. April 2012

o.A. 2011e

o.A. ; Liikennevirasto (Hrsg.): *Suomen rautatietilasto 2011.* Helsinki : Tuokinprint Oy, 2011 (Liikenneviraston tilastoja 5). – ISBN 978–952–255–683–7

o.A. 2012a

o.A.: Auszug - Umsetzungskonzept für das Zielnetz 2013plus des Schienenpersonennahverkehrs aus dem Nahverkehrsplan 2008 - mündlicher Bericht von Herrn Professor Siefer (IVE Braunschweig) / Region Hannover, Verkehrsausschuss. Hannover, März 2012. – Sitzungsniederschrift der Sitzung am 6. März 2012

o.A. 2012b

o.A. ; Tilastokeskus (Hrsg.): *Bevölkerungsstatistik.* Internetauftritt des finnischen Statistikamtes. `http://www.stat.fi/tup/suoluk/suoluk_vaesto_en.html`. Version: 2012. – Zugriff am 24. April 2013

o.A. 2012c

o.A.: *PROJET RER B NORD - Avancement des travaux et Perspectives d'améliorations*. Präsentation im Comité de ligne B am 6. Juli 2012, Juli 2012

o.A. 2012d

o.A. ; RATP (Hrsg.): RER A - Fiche horaire, Direction St Germain en- Laye. Poissy- Cergy / Régie autonome des Transports parisiens (RATP). Paris, September 2012. – Fahrplan. – Gültig ab 3. September 2012

o.A. 2012e

o.A.: Umsetzungskonzept für das Zielnetz 2013plus des Schienenpersonennahverkehrs / Region Hannover, Verkehrsausschuss. Hannover, Februar 2012 (Nr. 0241 (III) BDs). – Beschlussdrucksache

o.A. 2013a

o.A.: Bienvenue sur le 1er réseau au monde / Conseil regional d Ile-de-France. 2013. – Internetauftritt. – http://www.iledefrance.fr/missions-et-competences/amenagement-transports/le-reseau-francilien/le-1er-reseau-au-monde/, Zugriff am 29. Mai 2013

o.A. 2013b

o.A.: DSB S-Tog Dag-Koreplan / DSB. Kopenhagen, 2013. – Fahrplanfaltblatt

o.A. 2013c

o.A.: Implodiert die Stuttgarter S-Bahn? In: *Eisenbahn-Revue International* 20 (2013), Juni, Nr. 6, S. 312–315. – ISSN 1421–2811

o.A. 2013d

o.A. ; DB Netz AG (Hrsg.): Infrastrukturregister / Deutsche Bahn AG. Version: 2013. `http://stredax.bahn.de/`. 2013. – Onlineregister. – letzter Zugriff: 24. April 2017

o.A. 2014a

o.A.: Dokumentation Planungsgrundlagen STEP Ausbauschritt 2030 - Anlageband / Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Verkehr. Bern, 2014. – Dokumentation. – Bezugsquelle: http://www.bav.admin.ch/fabi, Aktenzeichen: BAV-214-00002/00005/00003/00015

o.A. 2014b

o.A.: February 2014 Caltrain Annual Passenger Counts Key Findings / Caltrain Regional Rail Link. San Francisco, 2014. – Untersuchung

o.A. 2014c

o.A. ; DSB (Hrsg.): Foreløbige påstigere og afstigere for S-tog 2009-2013

/ DSB. Kopenhagen, 2014. – Onlineveröffentlichung. – Abrufbar unter https://www.dsb.dk/globalassets/kommunikation/tal-om-togrejser/af–og-pastigere-s-tog-hverdagsgennemsnit-pr–station.pdf, letzter Zugriff am 10. Juni 2017

o.A. 2014d

o.A.: Pendler profitieren von schneller Lösung. In: *NetzNachrichten* (2014), Nr. 2, S. 5

o.A. 2014e

o.A.: RER E - Prolongement d'Haussmann-Saint-Lazare à Mantes-la-Jolie / Stif. Paris, April 2014. – Informationsblatt

o.A. 2015a

o.A.: Der ET 442 - kleiner Leitfaden / DB Regio AG, S-Bahn Nürnberg. Nürnberg, 2015. – Kundenbroschüre

o.A. 2015b

o.A.: Marktuntersuchung Eisenbahnen 2015 / Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. Bonn, Dezember 2015. – Bericht

o.A. 2015c

o.A.: TIB-S - Strækningsoversigter / Banedanmark. Kopenhagen, 2015. – Betriebliche Unterlage

o.A. 2016a

o.A.: Bundesverkehrswegeplan 2030 (Entwurf März 2016) / Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin, 2016. – Entwurfsfassung

o.A. 2016b

o.A.: California Passenger Rail Network Schematics / SMA Rail Consulting and IT, Corp. 2016. – Booklet

o.A. 2016c

o.A. ; Bundesministerium des Innern (Hrsg.) ; Bundesverwaltungsamt (Hrsg.): Handbuch für Organisationsuntersuchung und Personalbedarfsermittlung / Bundesministerium des Innern, Bundesverwaltungsamt. Köln, Berlin, Juni 2016. – PDF-Arbeitsversion

o.A. 2016d

o.A.: Vertrag über die Durchführung von Verkehrsleistungen im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) auf den Linien S41, S42, S46, S47 und S8 der Berliner S-Bahn / Land Berlin, Land Brandenburg, S-Bahn Berlin GmbH. Berlin, 2016. – Verkehrsvertrag

Oeftering 1964

Oeftering, Heinz M.: Der Verkehr in der modernen Massengesellschaft. In: *Die Bundesbahn* 38 (1964), Nr. 15-16, S. 513–518. – ISSN 0007–5876

Oetting 2003

Oetting, Andreas: Einfluss des Verkehrsangebots auf die Verkehrserzeugung. In: *Internationales Verkehrswesen* 55 (2003), Nr. 12, S. 614–617. – ISSN 0020–9511

Oetting 2005

Oetting, Antje: *Physikalische Maßstäbe zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken.* Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diss., November 2005

Pachl 2008

Pachl, Jörn: *Systemtechnik des Schienenverkehrs.* 5. bearbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2008. – ISBN 978–3–8351–0191–3

Pachl 2013

Pachl, Jörn: *Systemtechnik des Schienenverkehrs.* 7. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2587-2. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2587-2. – ISBN 978–3–8348–2586–5

Pachl 2015

Pachl, Jörn: *Das Sperrzeitenmodell in der Fahrplankonstruktion.* Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015 (essentials). http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-11128-1. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-11128-1. – ISBN 978–3–658–11128–1

Pohlmann 2012

Pohlmann, Rainer ; GmbH, ETC Transport C. (Hrsg.): Qualifizierende Untersuchung von Varianten zur Einbindung des Prignitz-Express (pe) über die Kremmener Bahn nach Berlin / Etc Transport Consultants GmbH. Berlin, März 2012. – Abschlussbericht

Priebs 2007

Priebs, Axel: Der Kopenhagener Fingerplan lebt! In: *Raumplanung - Fachzeitschrift für räumliche Planung und Forschung* 135 (2007), Dezember, Nr. 12, S. 271–276. – ISSN 0176–7534

Pulkkinen u. Stammler 2008

Pulkkinen, Kai ; Stammler, Horst: Brutto oder Netto? Verkehrsverträge im SPNV. In: *Der Nahverkehr* 26 (2008), Nr. 3, S. 8–13. – ISSN 0722–8287

Rappert u. a. 2016

Rappert, Andreas ; Riedl, Juliane ; Thien-Seitz, Uta: *Statistisches Taschenbuch 2016 - München und seine Stadtbezirke*. München : Statistisches Amt der Landeshauptstadt München, 2016

Reinhardt 2012

Reinhardt, Winfried: *Öffentlicher Personennahverkehr*. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg und Teubner, 2012. – ISBN 978–3–8348–1268–1

Rey 2007

Rey, Georges: Entwicklung des ITF von den Anfängen bis zur Gegenwart. In: *Eisenbahntechnisches Kolloquium 2007*. Darmstadt, 2007

Richter u. Fisser 2012

Richter, Markus ; Fisser, Marc: Neues Zeitalter für Bahnpendler aus Springe? In: *Neue Deister-Zeitung* (2012), Februar. – Ausgabe vom 10. Februar 2012

von Röll 1912

In: Röll, Freiherr V.: *Enzyklopädie des Eisenbahnwesens*. Bd. 2: *Berliner Stadtbahn*. 2. Auflage. Berlin, Wien : ohne Angabe, 1912, S. 246–250. – Frei zugänglich im Internet unter http://www.zeno.org/nid/20011402539. Letzter Zugriff am 7. Mai 2017

Roth 2015

Roth, Claudine: Wie die SOB Geld verdient. In: *Schriftzug* (2015), Nr. Herbst

Rudolph u. Siefer 2009

Rudolph, Raphaela ; Siefer, Thomas: Betrieblicher Fahrplan und "gefühlte"Verspätung. In: *ZEVrail* 133 (2009), Nr. 2009-133, S. 1–4

Schäfer 2016

Schäfer, Frank: Verkehrsmärkte. In: Jänsch, Eberhard (Hrsg.): *Handbuch das System Bahn*. 2. Auflage. Hamburg : Eurailpress, 2016. – ISBN 978–3–87154–511–5, Kapitel 5, S. 82–0102

Scherbarth 2013

Scherbarth, Johannes: *Analyse der Trassennutzung auf der Anhalter Bahn zwischen Berlin und Lutherstadt Wittenberg und Ansätze zur Kapazitätssteigerung durch differenzierte Bedienung*, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Masterarbeit, 2013

Schittenhelm 2011

Schittenhelm, Bernd: Präsentation der Kopenhagener S-Bahn / Banedanmark. Kopenhagen, September 2011. – Folienpräsentation im Rahmen der Sommerexkursion des Fachgebietes Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der Technischen Universität Berlin

Schmid 2011

Schmid, Kuno: Flirt-Triebzug Sm5 im Betriebseinsatz auf der S-Bahn Helsinki. In: *Eisenbahn-Revue International* 18 (2011), Januar, Nr. 1, S. 13–15. – ISSN 1421–2811

Schmidt u. a. 2008

Schmidt, Philipp ; Weidmann, Ulrich ; Wichser, Jost: *Systemvorschlag für ein neues schweizerisches Trassenpreissystew.* Zürich : Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2008 (Schriftenreihe Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme 137)

Schnee 2009

Schnee, Mathias: *Fully Realistic Multi-Criteria Timetable Information Systems.* Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, Oktober 2009

Schnieder 2007

Schnieder, Eckehard: *Verkehrsleittechnik.* Springer, 2007. – ISBN 978–3–540–48541–4

Scholz 2011

Scholz, Gero: *IT-Systeme für Verkehrsunternehmen.* dpunkt.verlag, 2011. – ISBN 978–3–89864–770–0

Schönberger 2004

Schönberger, Lukas: *Der ICE-Bahnhof als Standortfaktor für die Region Montabaur.* Vallendar, Lehrstuhl für Mikroökonomik und Industrieökonomik , Otto-Beisheim-Hochschule, Praxisarbeit, 2004

Schouboe Sloth 2011

Schouboe Sloth, Maria: S-tog tester køreplan uden faste minuttal på linje B / Produktionsdirektør i DSB S-tog. Kopenhagen, September 2011. – Pressemitteilung

Schreck u. a. 1972

Schreck, Karl ; Strumpf, Reinhard ; Meyer, Heinz: *S-Bahnen in Deutschland - Planung, Bau, Betrieb.* Düsseldorf : Alba Buchverlag GmbH + Co. KG, 1972. – ISBN 978–3–87094–300–4

Schumacher 2007

Schumacher, Oliver: Fahrplanprobebetrieb zwischen Erding und München / Deutsche Bahn AG. Berlin, September 2007. – Pressemitteilung

Seyb 2009

Seyb, Wolfgang: 10 Jahre Wettbewerb im SPNV / Deutsche Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft e.V., Bezirksvereinigung Schleswig-Holstein. Kiel, September 2009. – Folienpräsentation

Siegmann 2001

Siegmann, Jürgen: Bahnbetrieb / Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Technische Universität Berlin. Berlin, 2001. – Vorlesungsskript Sommersemester 2001

Siegmann u. Große 2002

Siegmann, Jürgen ; Grosse, Christine: Möglichkeiten zur Gewinnung neuer Kunden. In: *ZEVrail Glasers Annalen* 126 (2002), Dezember, Nr. 12, S. 564–568. – ISSN 1618–8330

Socialdata 1993

Socialdata: Chancen für Busse und Bahnen - Potenziale für Verhaltensänderungen in Ballungsräumen / Verband Deutscher Verkehrsunternehmen und Deutsche Bundesbahn/Deutsche Reichsbahn. Köln, 1993 (4). – Broschüre. – Bericht im Rahmen der Gemeinschaftswerbung unter dem Motto Zeit zum Umdenken - Busse und Bahnen

Sparkuhle 1969

Sparkuhle, Hans: Paris von morgen Verkehrsanlagen für das Jahr 2000. In: *Die Bundesbahn* 43 (1969), Nr. 21/22, S. 1109–1112. – ISSN 0007–5876

STIF 2005

STIF: *Les Transports en commun en Chiffres en Ile-de-France*. Präsentation. `http://www.stif.info/information-communication/communication/nos-publications/les-transports-chiffres-67.html?var_recherche=chiffres`. Version: Juni 2005. – Letzter Zugriff: 19. November 2012

STIF 2012

STIF: Schéma Directeur du RER A / Syndicat des transports d Ile-de-France (STIF). Paris, Juni 2012 (2012/0163). – Entwicklungsplan. – Beschluss in der Sitzung vom 6. Juni 2012. Online abrufbar: http://www.stif.org/IMG/pdf/Deliberation_no2012-0163_relative_au_schema_directeur_du_RER_A.pdf. Letzter Zugriff am 8. Mai 2017

STIF 2013

STIF: Schéma Directeur du RER B Sud / Syndicat des transports d Ile-de-France (STIF). Paris, April 2013 (2013/172). – Entwicklungsplan. – Beschlossen auf der Sitzung vom 10. Juni 2013. Online abrufbar unter http://www.stif.org/IMG/pdf/Deliberation_2013-172_-_Schema_directeur_RER_B_Sud-4.pdf. Letzter Zugriff am 8. Mai 2017

STIF 2015

STIF: *Fréquentation annuelle et journalière.* Excel-File zum Download auf http://www.omnil.fr/spip.php?article119, Dezember 2015. – Zugriff am 2. Februar 2017

STIF 2016

STIF: *Niveau d'offre réalisée sur le réseau de transports collectifs francilien.* Excel-File zum Download auf http://www.omnil.fr/spip.php?article118, September 2016. – Zugriff am 2. Februar 2017

Stohler u. Stähli 2012

Stohler, Werner ; Stähli, Luigi: Fahrplan-Revolution in Frankreich. In: *Eisenbahn-Revue International* 19 (2012), Januar, Nr. 01, S. 18–21. – ISSN 1421–2811

Storchmann 1999

Storchmann, Karl-Heinz: *Das Defizit im öffentlichen Personennahverkehr in Theorie und Empirie.* Berlin : Duncker & Humblot, 1999 (Schriftenreihe des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung 64). – ISBN 978–3–428–09783–8

Thorlacius 2013

Thorlacius, Per: *Rolling Stock Planning at DSB S-tog - WP1 - Processes, Cost Structures and Requirements.* Lyngby, Danmarks Tekniske Universitet, Working Paper, September 2013

Thorlacius 2017

Thorlacius, Per: *Integrated Rolling Stock Planning for Suburban Passenger Railways.* Lyngby, Technical University of Denmark, Dissertation, Mai 2017

Tietze 1998

Tietze, Christian: Triebzug der Baureihe 424 für S-Bahn Hannover vorgestellt. In: *Eisenbahn-Revue International* 5 (1998), April, Nr. 4, S. 154–156. – ISSN 1421–2811

Trafiksäkerhetsverket 2013

Trafiksäkerhetsverket: TRAFI/22096/03.04.02.00/2012 - Delsystemen Trafikstyrning och signalering / Trafiksäkerhetsverket. 2013. – Vorschrift

Trefflich 2010

Trefflich, Benjamin: *Videogestützte Überwachung der Fahreraufmerksamkeit und Adaption von Fahrerassistenzsystemen.* Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Diss., Februar 2010

Trost 2006

Trost, Dirk G.: Zehn Jahre Regionalisierung des SPNVs. In: *Internationales Verkehrswesen* 58 (2006), Nr. 10, S. 450–456. – ISSN 0020–9511

Vallee 2003

Vallee, Dirk: 25 Jahre S-Bahn in der Region Stuttgart. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 56 (2003), November, Nr. 11, S. 655–665. – ISSN 0013–2845

Vieregg u. Rößler 2007

Vieregg, Martin ; Rössler, Karlheinz: Machbarkeitsstudie für die Einführung des 10-Minuten-Taktes auf dem Ostast der S 2 München Ost - Markt Schwaben auf den bestehenden 2 Gleisen (ohne 4-gleisigen Ausbau) / VIEREGG-RÖSSLER GmbH Innovative Verkehrsberatung. München, September 2007 (2. aktualisierte Auflage). – Auftragsstudie

VR 2011

VR: *Lähiliikenne / Närtrafik*. Fahrplanheft, gültig 15.08.2011 - 03.06.2012, August 2011

Vromans 2005

Vromans, Michiel: *Reliability of Railway Systems*. Rotterdam, Erasmus Universiteit Rotterdam, Dissertation, 2005

Vuchic 1981

Vuchic, Vukan R.: *Urban public transportation - Systems and Technology*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall, 1981. – ISBN 978–0–13–939496–6

Vuchic 1986

Vuchic, Vukan R.: Metro systems in year 2000 - modernization, diversification and expansion. In: *UITP Revue* 35 (1986), Nr. 4, S. 307–334. – ISSN 0041–5154

Walf 2008

Walf, Fabian: *Änderung des Grundtaktes von S-Bahn-Systemen*, Technische Universität Berlin, Diss., April 2008

Walther u. a. 1997

Walther, Klaus ; Oetting, Klaus ; Vallee, Dirk: Simultane Modellstruktur für die Personenverkehrsplanung - Auf der Basis eines neuen Verkehrswiderstands. In: *Schriftenreihe des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen* 52 (1997). – ISSN 0176 – 9359

Weber 2004

Weber, Godehard: Der Fahrplan - Kernelement des Eisenbahnbetriebes. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 57 (2004), Juni, Nr. 6, S. 340–344. – ISSN 0013–2845

Wegner 2012

Wegner, Beatrix: Fahrplanbuch und Fahrkartenautomat für die Jackentasche - Apps und mobile Dienste. In: *Verkehr und Technik* 65 (2012), Nr. 2, S. 51–54. – ISSN 0340–4536

Weidmann 1994

Weidmann, Ulrich: *Der Fahrgastwechsel im öffentlichen Personenverkehr.* Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 1994

Weidmann 2013a

Weidmann, Ulrich: System- und Netzplanung - Grundlagen der System- und Netzplanung / Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich, 2013. – Vorlesungsskript

Weidmann 2013b

Weidmann, Ulrich: System- und Netzplanung - System- und Netzplanung des Personenverkehrs / Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich, 2013. – Vorlesungsskript

Werner 2009

Werner, Jan: Regulierung von Infrastrukturzugang und Netzentgelten. In: Lange, Joachim (Hrsg.) ; Evangelische Akademie Loccum (Veranst.): *Bahnpolitik und Börsengang [Dokumentation einer Tagung der Evangelischen Akademie Loccum vom 8. bis 10. Oktober 2008]* Bd. 62/08. Rehburg-Loccum : Evangelische Akademie Loccum, Protokollstelle, 2009. – ISBN 978–3–8172–6208–3, S. 61–70

Wiegelmann 2005

Wiegelmann, Lars: *Abschätzung der Erfolgsaussichten verschiedener Angebotsstrategien im Eisenbahnpersonenverkehr auf der Basis von Analysen der Zahlungsbereitschaften im Personenverkehr.* Berlin, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Studienarbeit, 2005

Zabel 1957

Zabel, Hans-Henning: *Tarifvertrag und Europäische Integration.* Tübingen, Eberhard-Karls-Universität, Dissertation, Dezember 1957

Zimmer 1960

Zimmer, Gerhard: Bahngestaltung aus dem Fahrplan. In: *Signal und Draht* 54 (1960), Mai, Nr. 5, S. 85–90. – ISSN 0037–4997

Zimmer 1971a

Zimmer, Gerhard: Optimierung der Gleisanlagen einer Schnellfahrstrecke. In: *Signal und Draht* 65 (1971), Januar, Nr. 1, S. 3–15. – ISSN 0037–4997

Zimmer 1971b

Zimmer, Gerhard: Zugfolge und Betriebspunktabstände auf ein- und zweigleisigen Strecken mit neuzeitlicher Signal - und Nachrichtentechnik. In: *Signal und Draht* 65 (1971), März, Nr. 5, S. 79–85. – ISSN 0037–4997

Zoefeld 2016

Zoefeld, Katharina: First section of the Copenhagen S-Bane with new signaling in service / Siemens AG. München, März 2016 (PR2016030222MOEN). – Pressemitteilung

Anhang

A. Diagramme zu den vorgestellten Systemen

A.1. S-Bahn Berlin

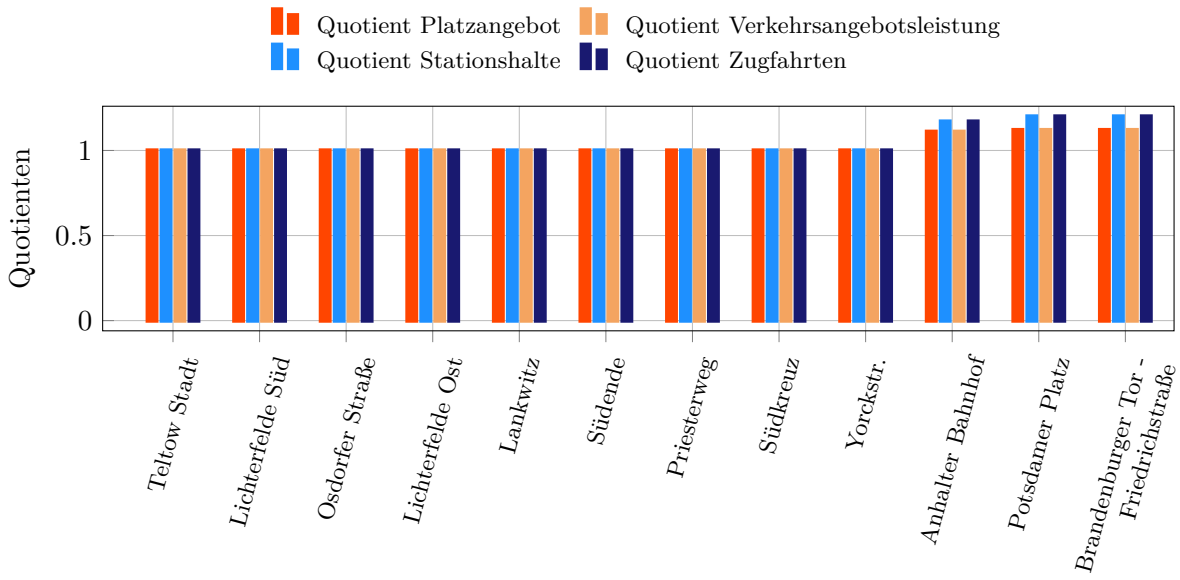

Abbildung A.1.1: Quotienten auf dem Ast Teltow Stadt - Friedrichstraße.

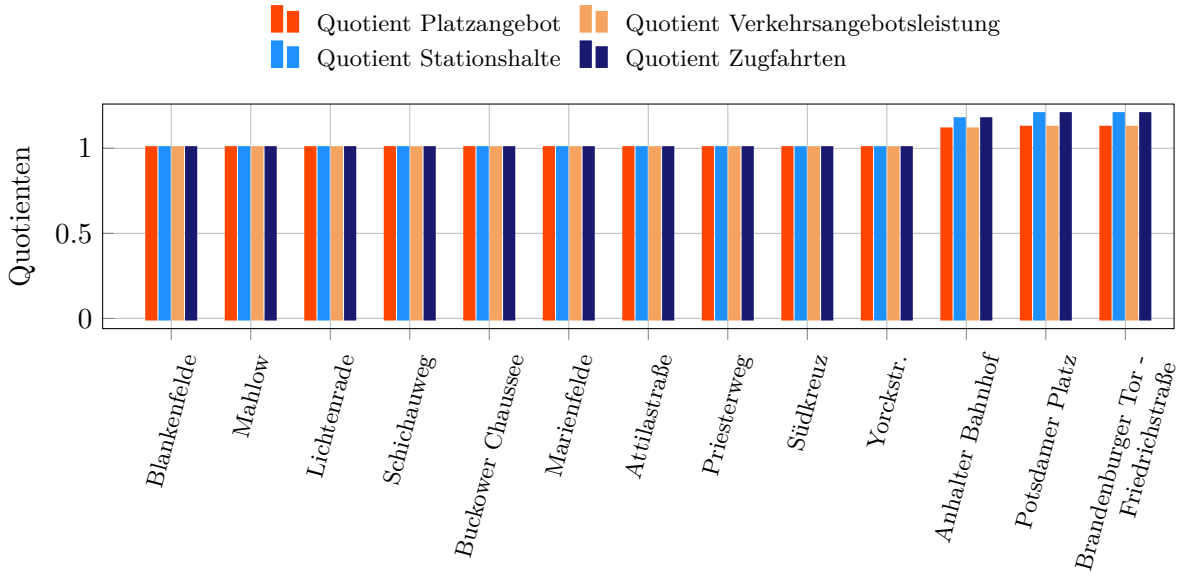

Abbildung A.1.2: Quotienten auf dem Ast Blankenfelde - Friedrichstraße.

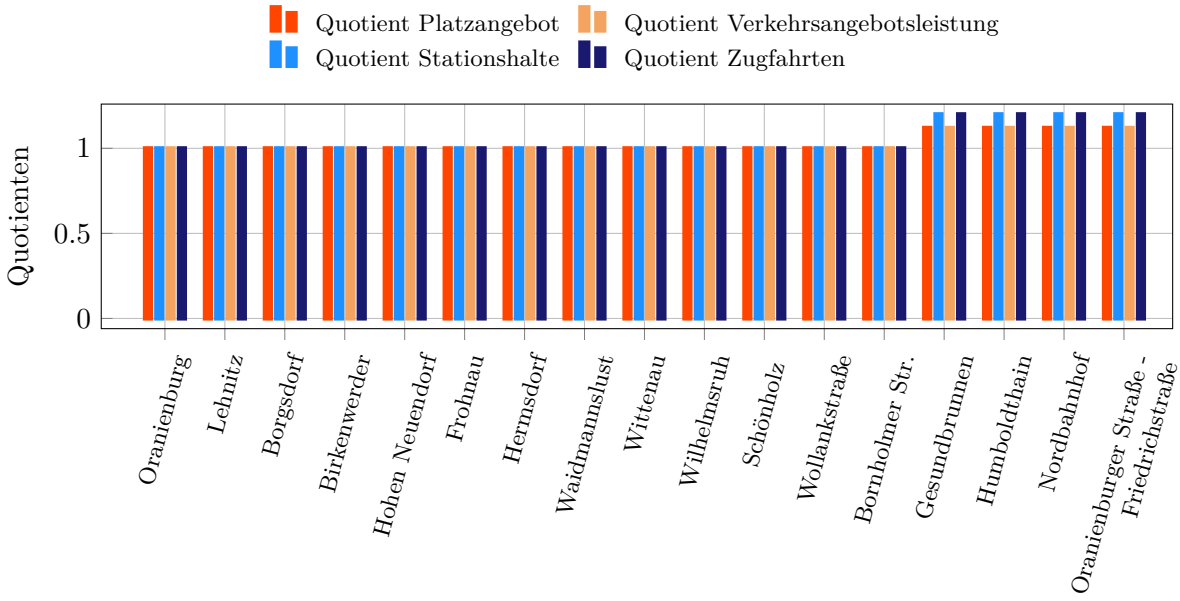

Abbildung A.1.3: Quotienten auf dem Ast Oranienburg - Friedrichstraße.

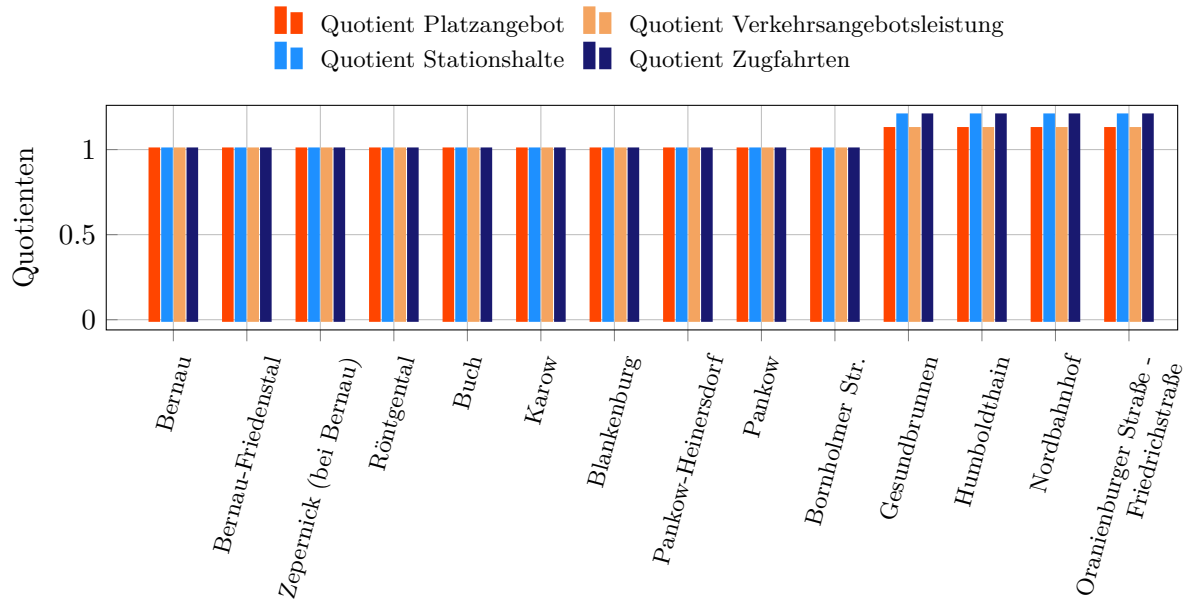

Abbildung A.1.4: Quotienten auf dem Ast Bernau - Friedrichstraße.

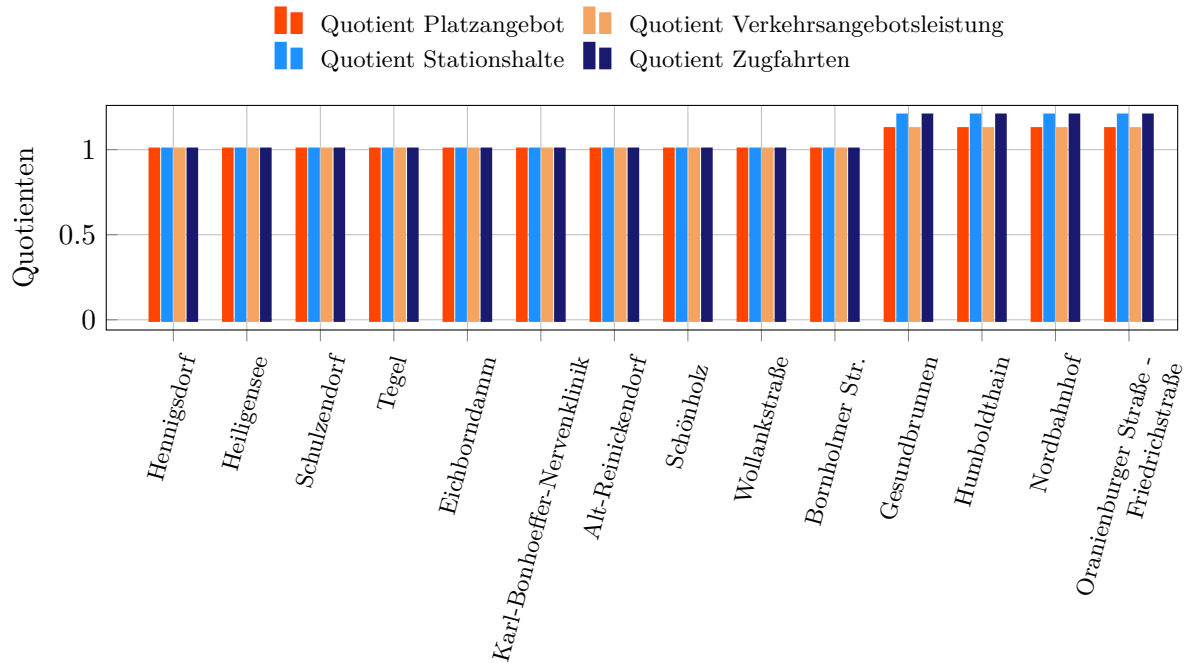

Abbildung A.1.5: Quotienten auf dem Ast Hennigsdorf - Friedrichstraße.

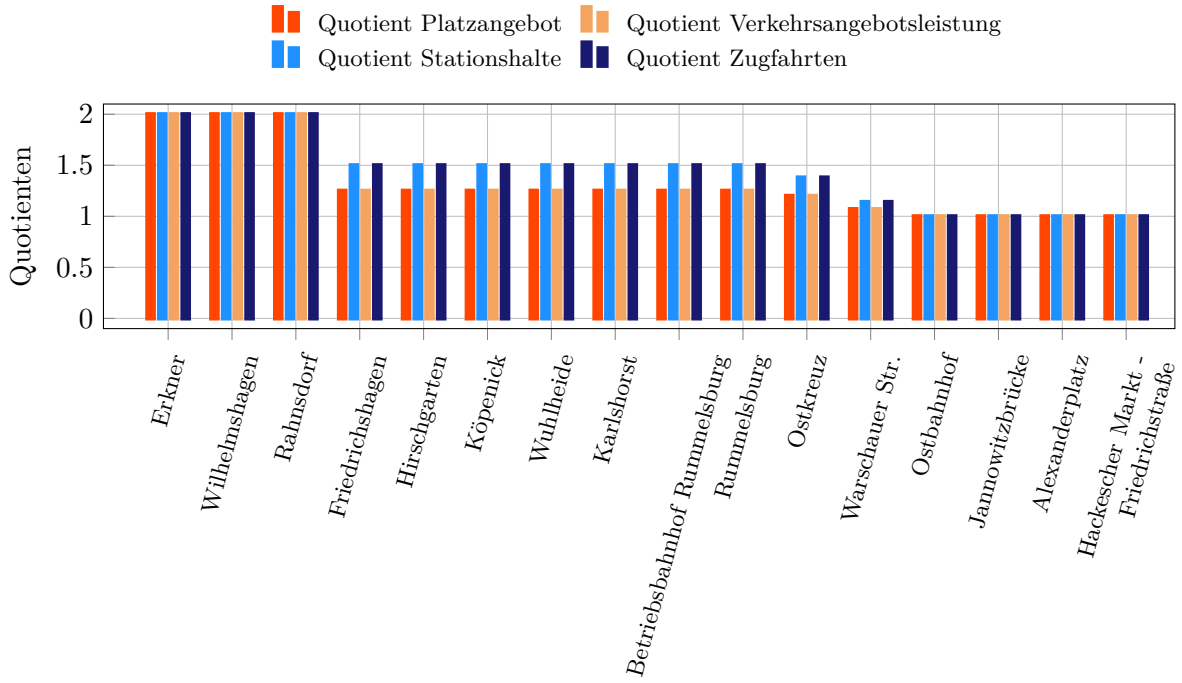

Abbildung A.1.6: Quotienten auf dem Ast Erkner - Friedrichstraße.

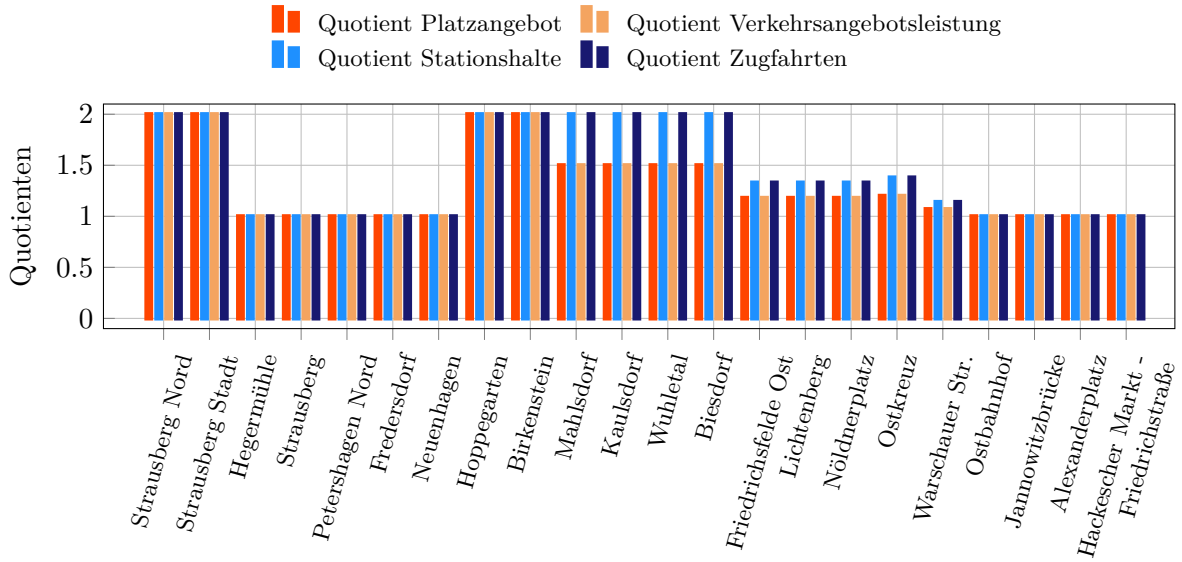

Abbildung A.1.7: Quotienten auf dem Ast Strausberg Nord - Friedrichstraße.

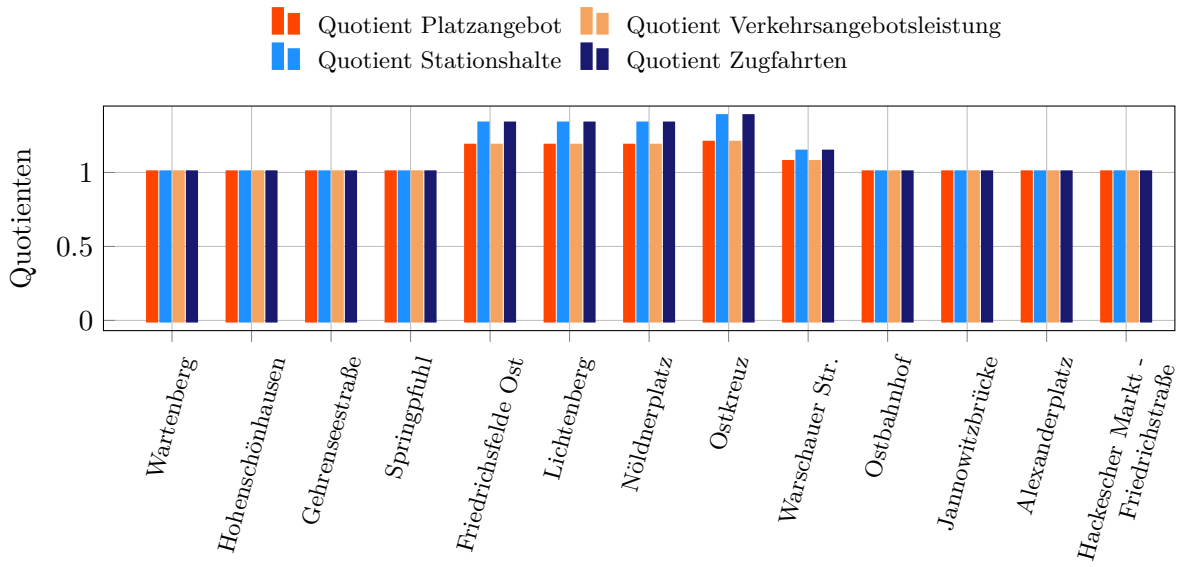

Abbildung A.1.8: Quotienten auf dem Ast Wartenberg - Friedrichstraße.

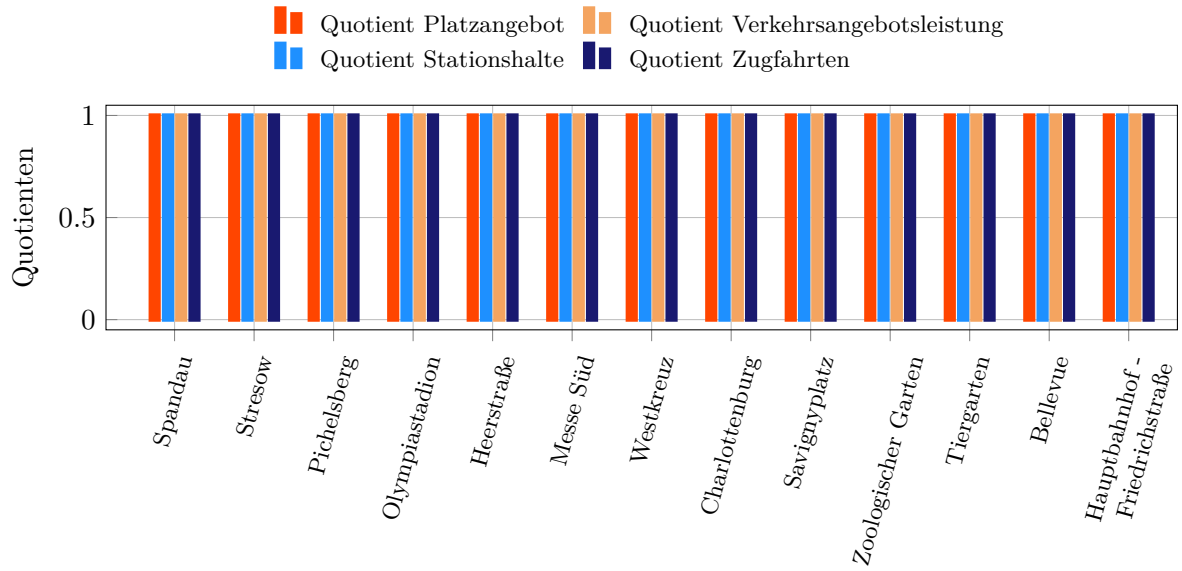

Abbildung A.1.9: Quotienten auf dem Ast Spandau - Friedrichstraße.

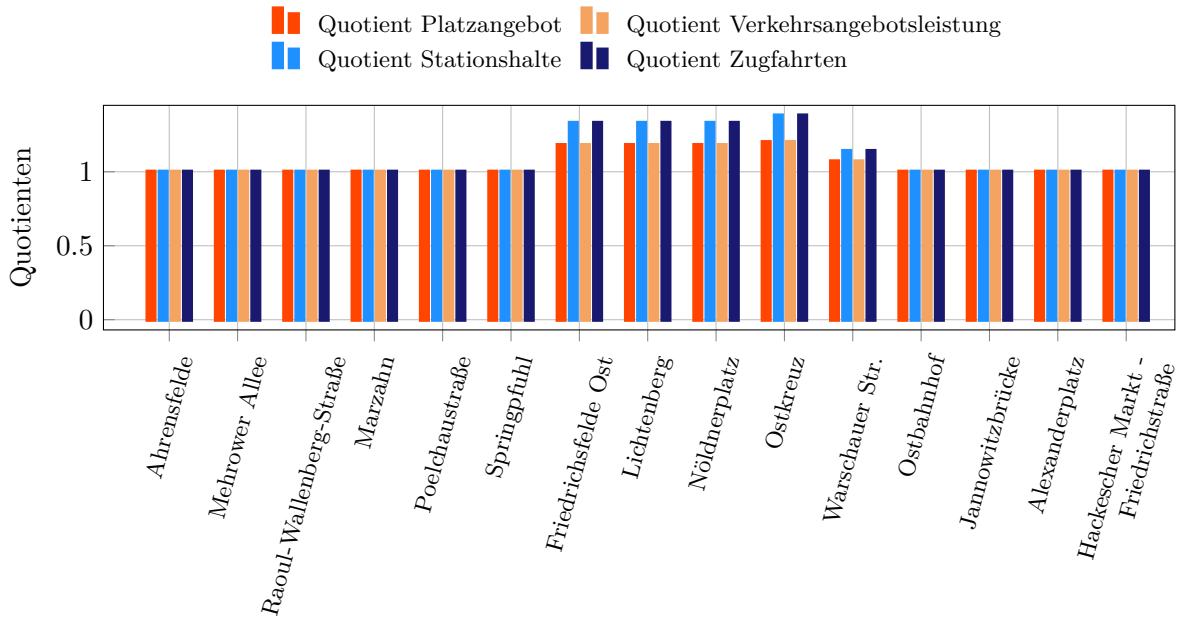

Abbildung A.1.10: Quotienten auf dem Ast Ahrensfelde - Friedrichstraße.

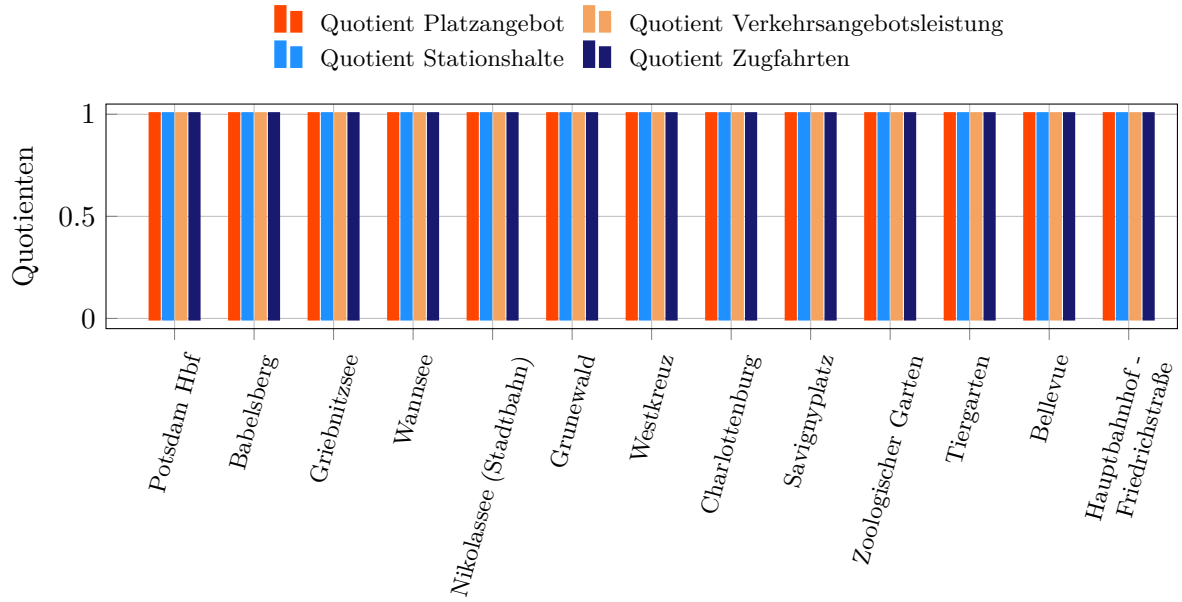

Abbildung A.1.11: Quotienten auf dem Ast Potsdam Hbf - Friedrichstraße.

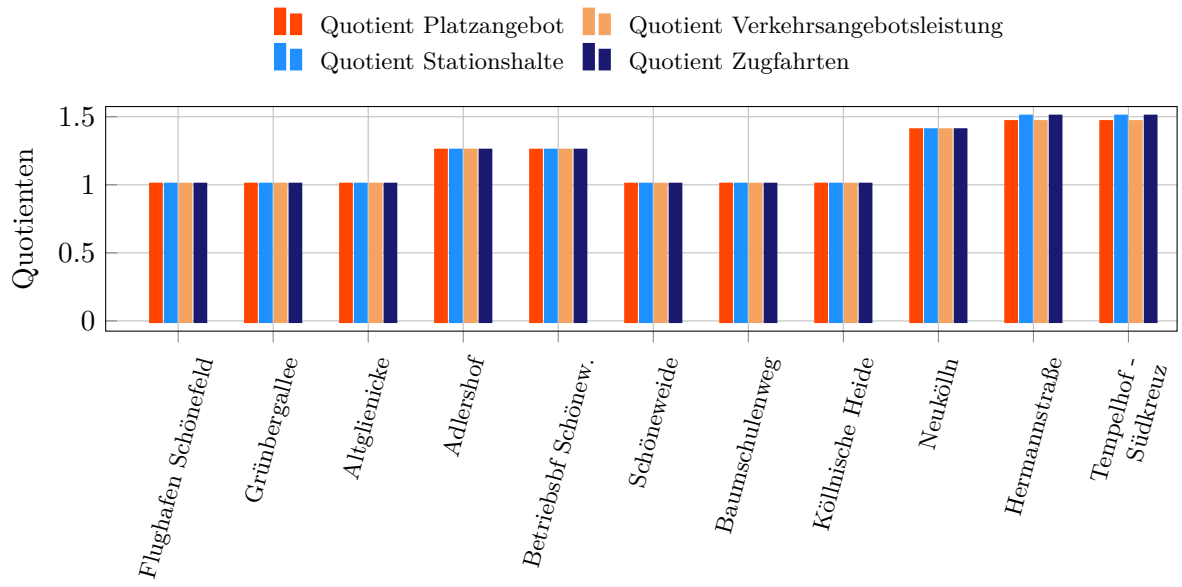

Abbildung A.1.12: Quotienten auf dem Ast Flughafen Schönefeld - Berlin Südkreuz.

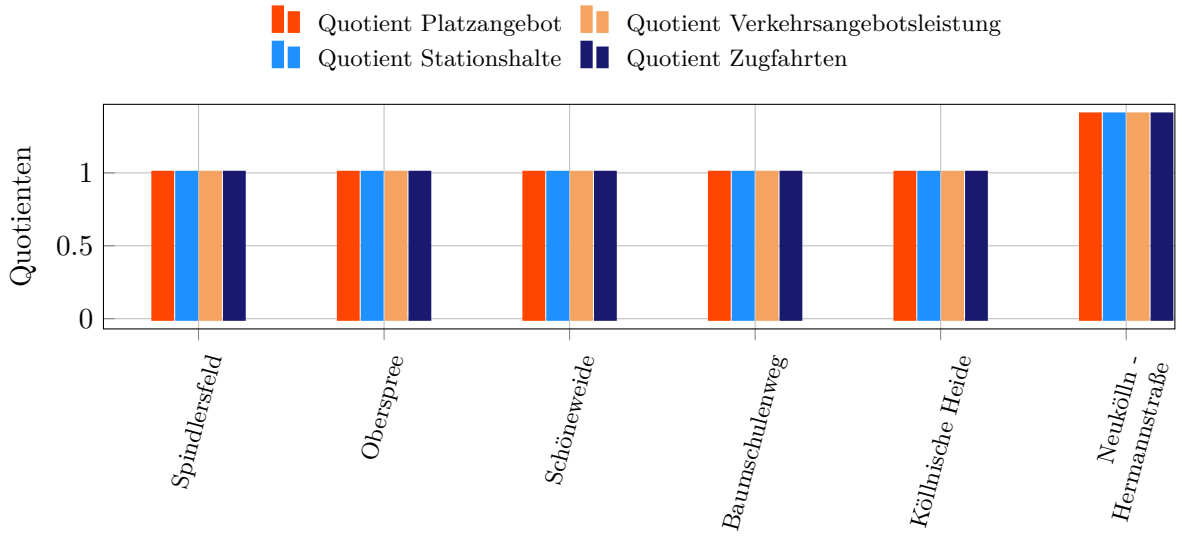

Abbildung A.1.13: Quotienten auf dem Ast Spindlersfeld - Hermannstraße.

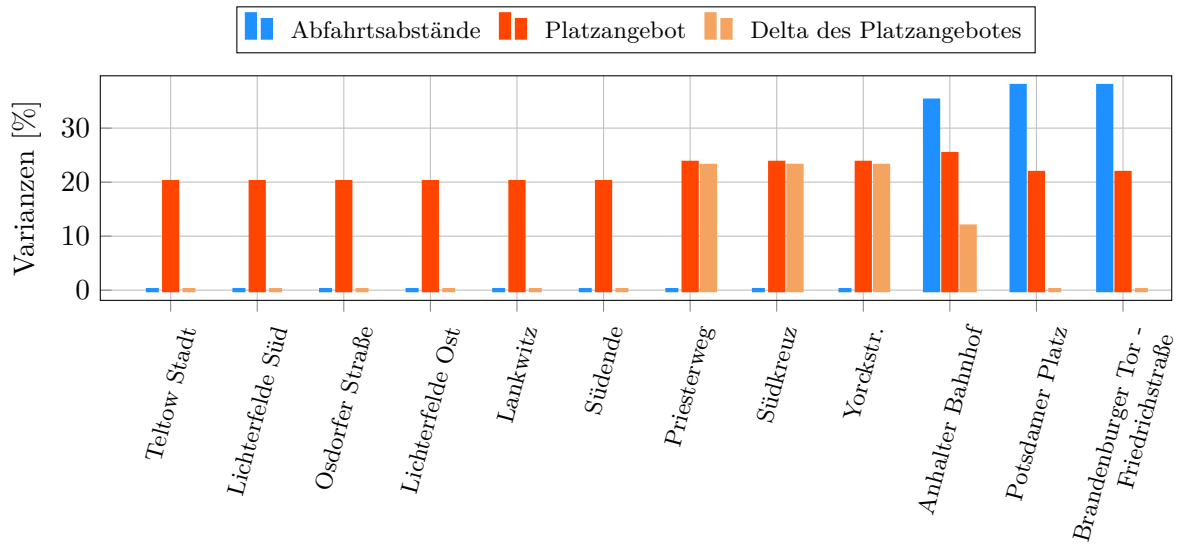

Abbildung A.1.14: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Teltow Stadt - Friedrichstraße in der HVZ.

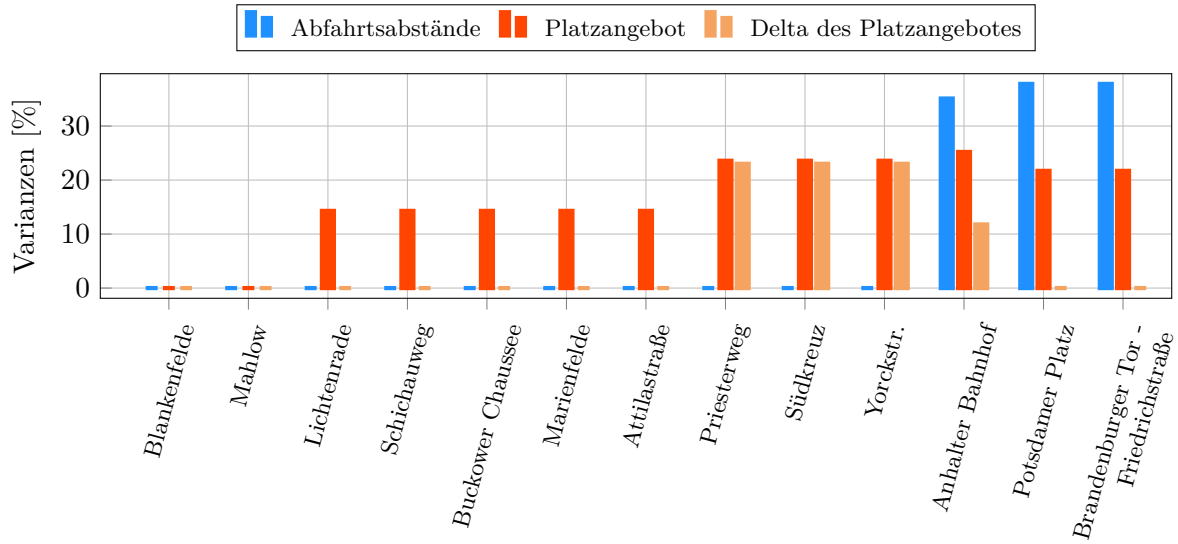

Abbildung A.1.15: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Blankenfelde - Friedrichstraße in der HVZ.

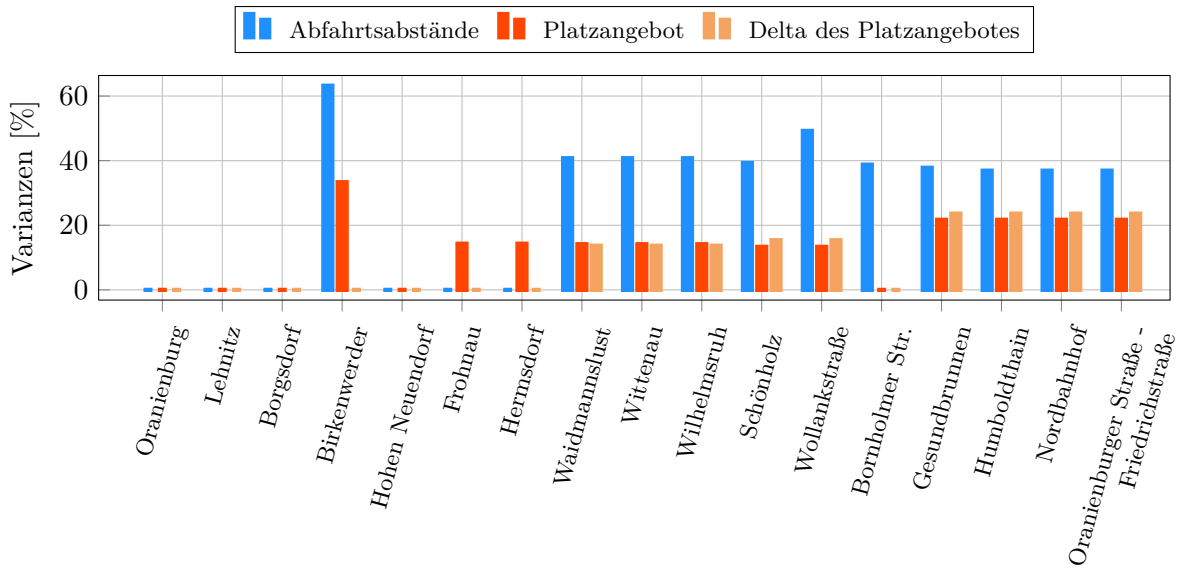

Abbildung A.1.16: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Oranienburg - Friedrichstraße in der HVZ.

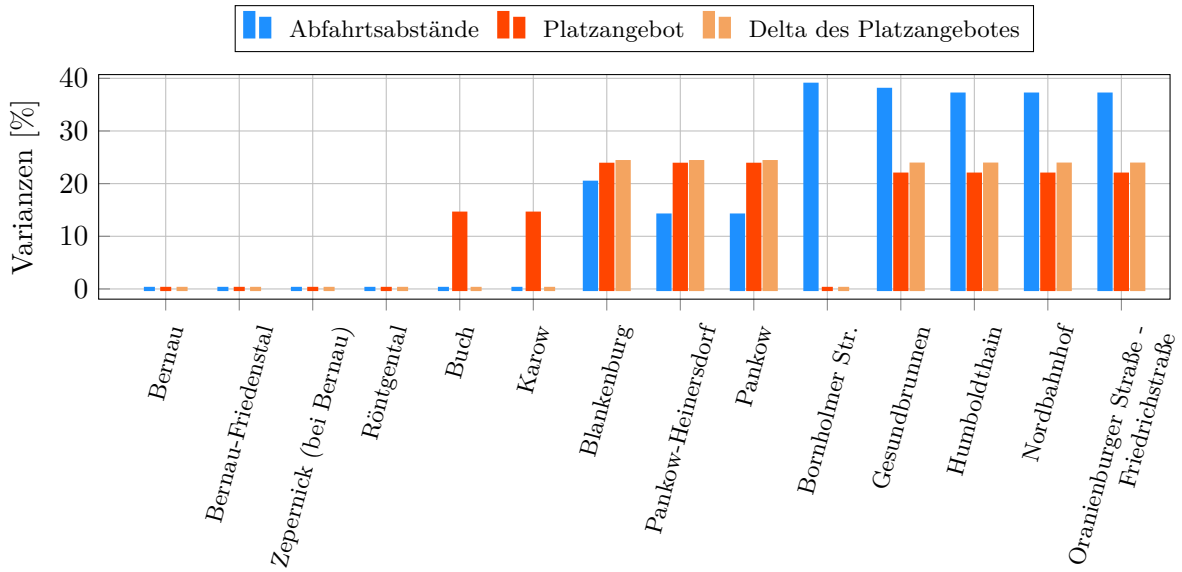

Abbildung A.1.17: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Bernau - Friedrichstraße in der HVZ.

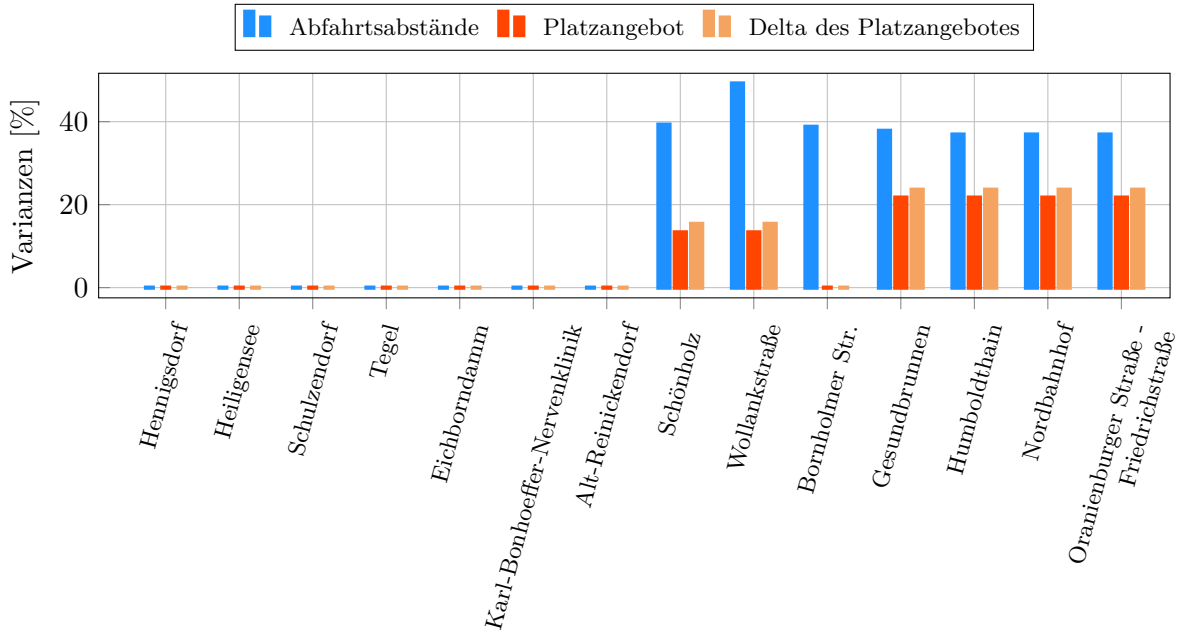

Abbildung A.1.18: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Hennigsdorf - Friedrichstraße in der HVZ.

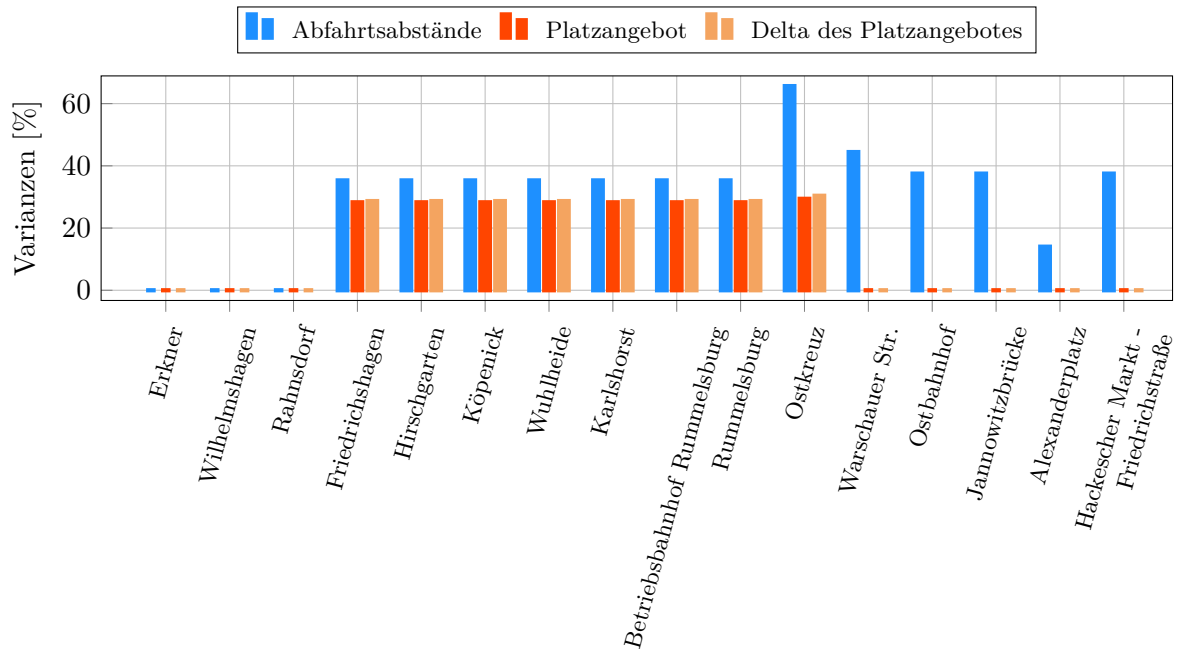

Abbildung A.1.19: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Erkner - Friedrichstraße in der HVZ.

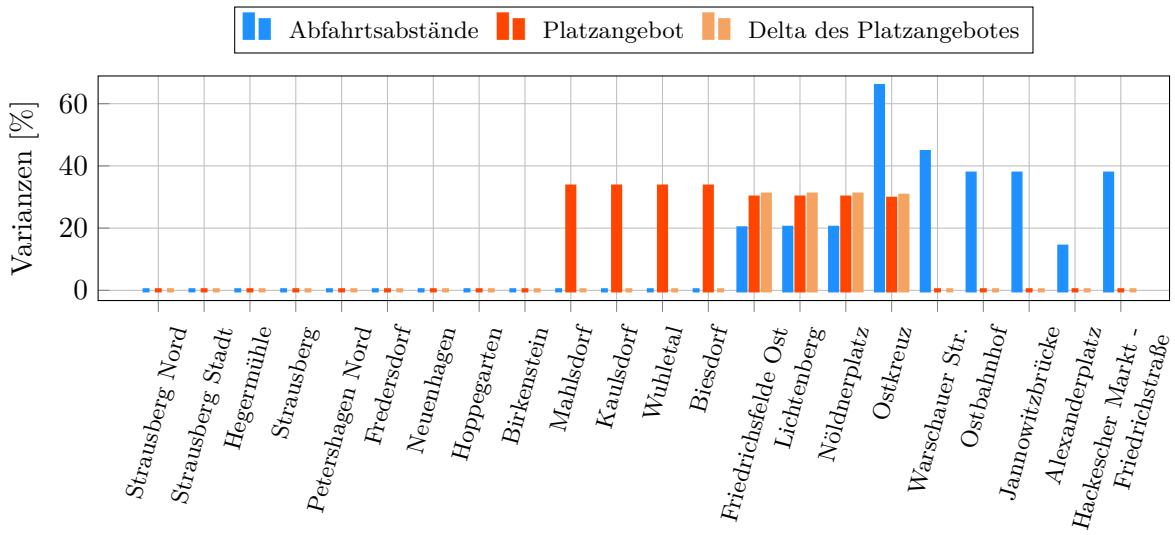

Abbildung A.1.20: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Strausberg Nord - Friedrichstraße in der HVZ.

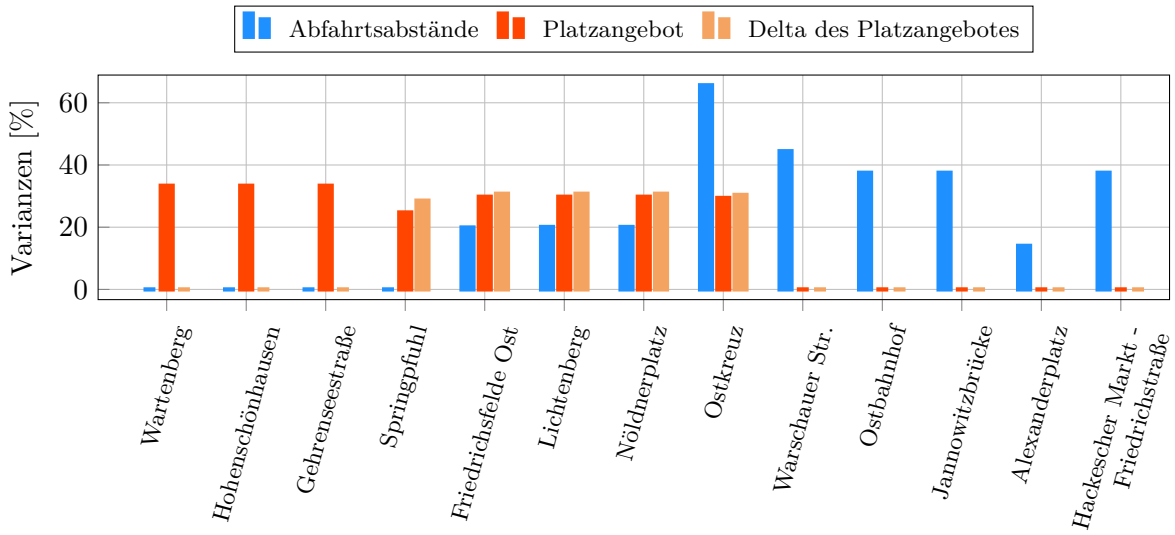

Abbildung A.1.21: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Wartenberg - Friedrichstraße in der HVZ.

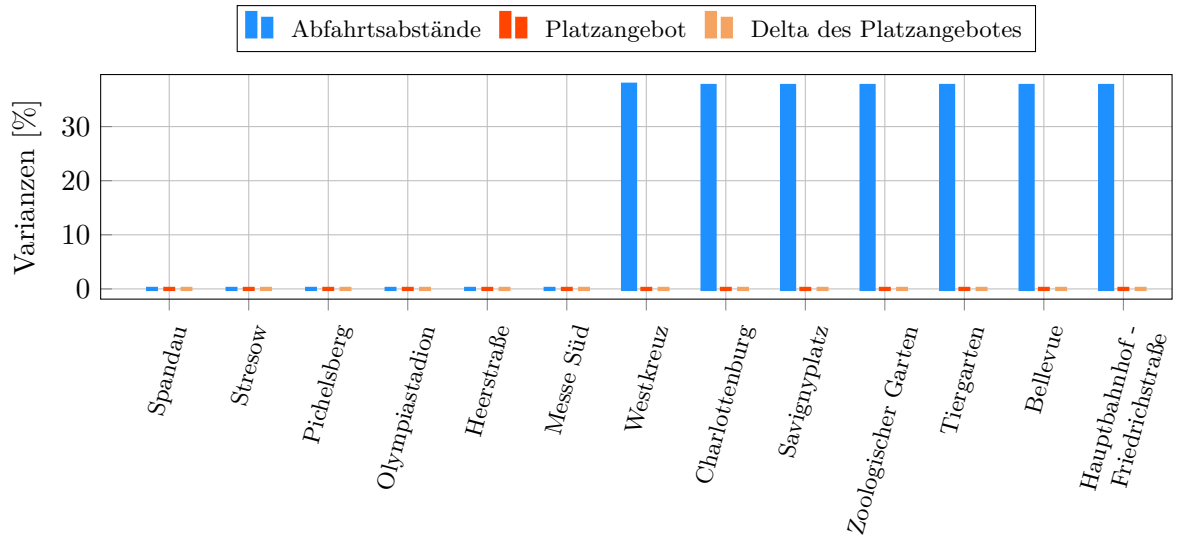

Abbildung A.1.22: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Spandau - Friedrichstraße in der HVZ.

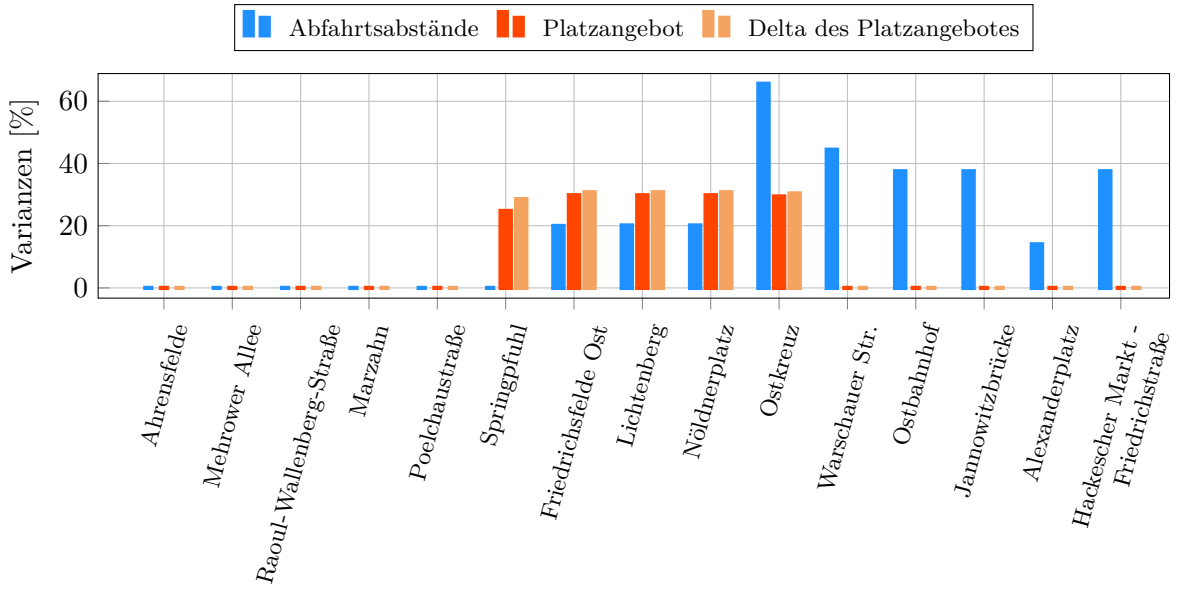

Abbildung A.1.23: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Ahrensfelde - Friedrichstraße in der HVZ.

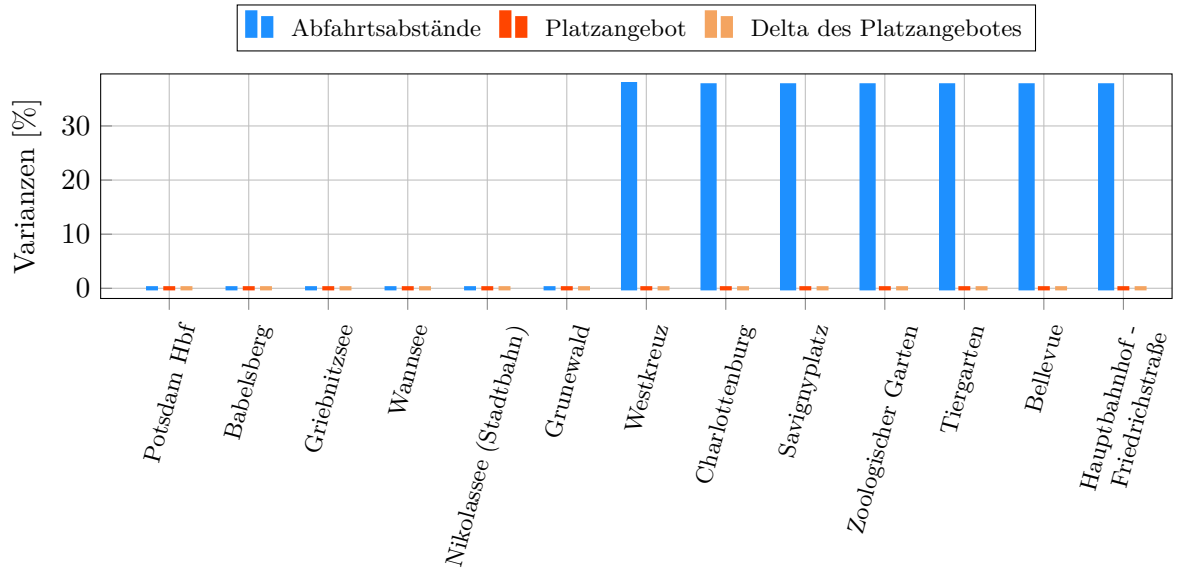

Abbildung A.1.24: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Potsdam Hbf - Friedrichstraße in der HVZ.

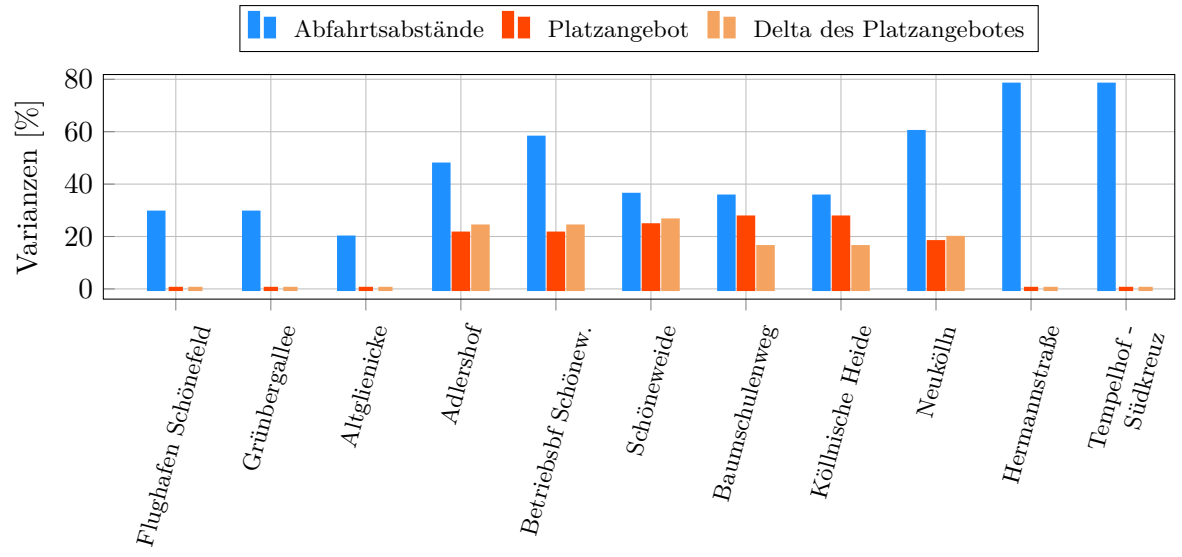

Abbildung A.1.25: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Flughafen Schönefeld - Berlin Südkreuz in der HVZ.

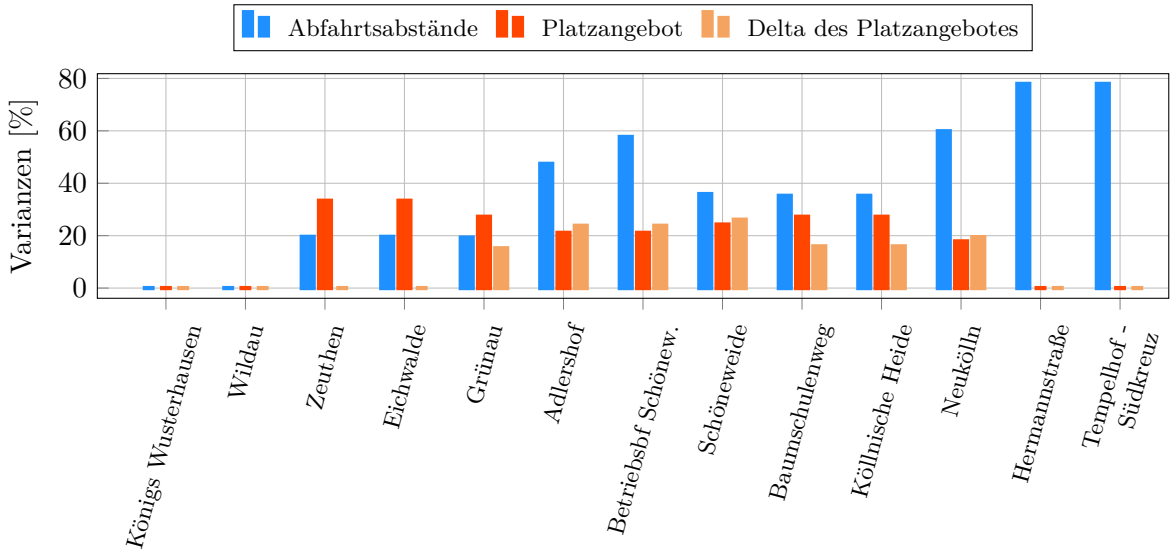

Abbildung A.1.26: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Königs Wusterhausen - Berlin Südkreuz in der HVZ.

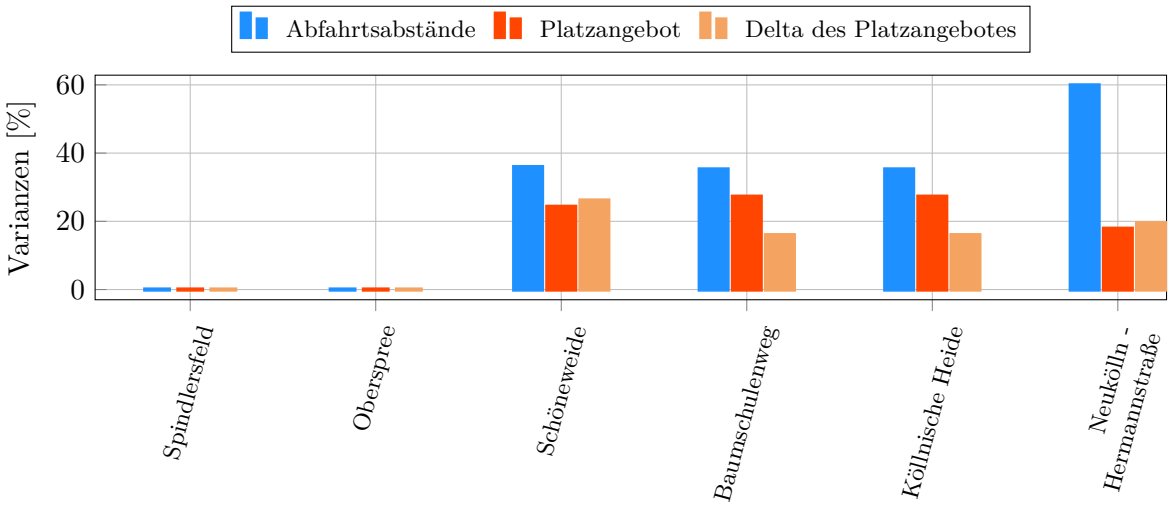

Abbildung A.1.27: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Spindlersfeld - Hermannstraße in der HVZ.

A.2. S-Bahn Hannover

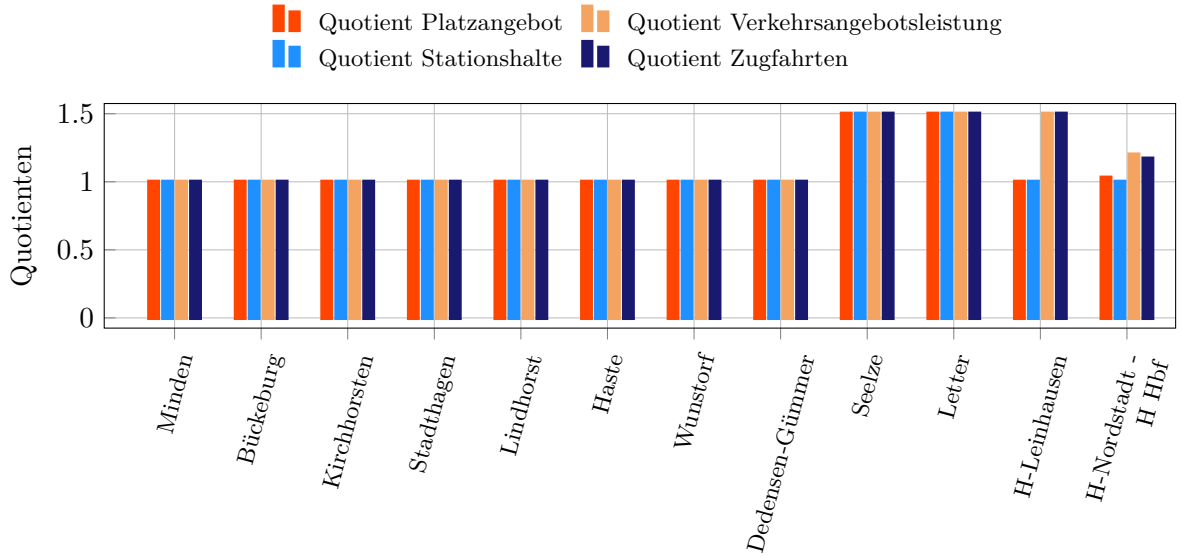

Abbildung A.2.1: Quotienten auf dem Ast Minden - Hannover Hbf.

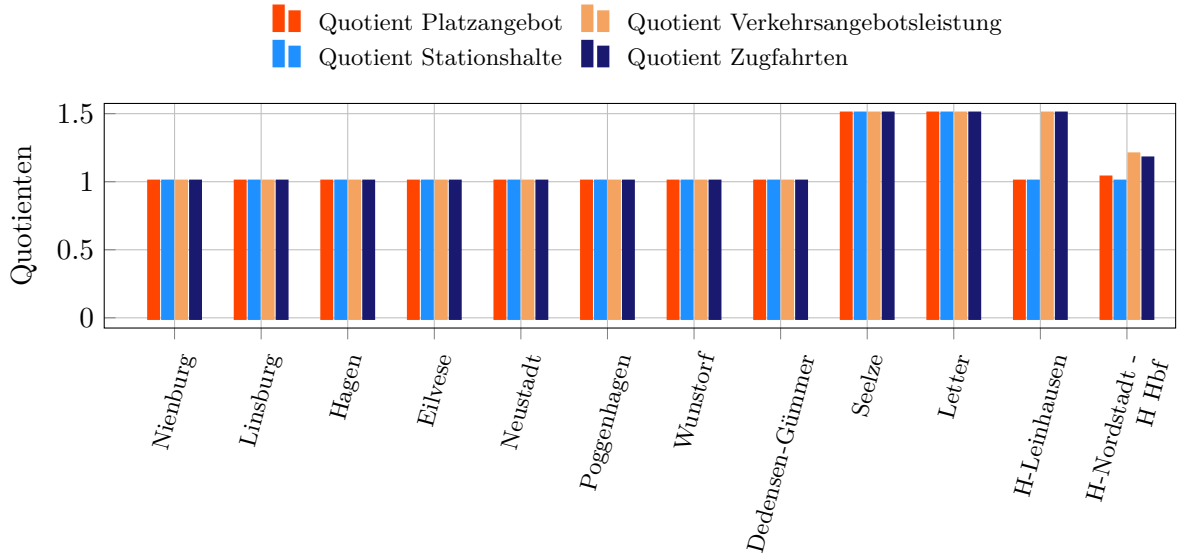

Abbildung A.2.2: Quotienten auf dem Ast Nienburg - Hannover Hbf.

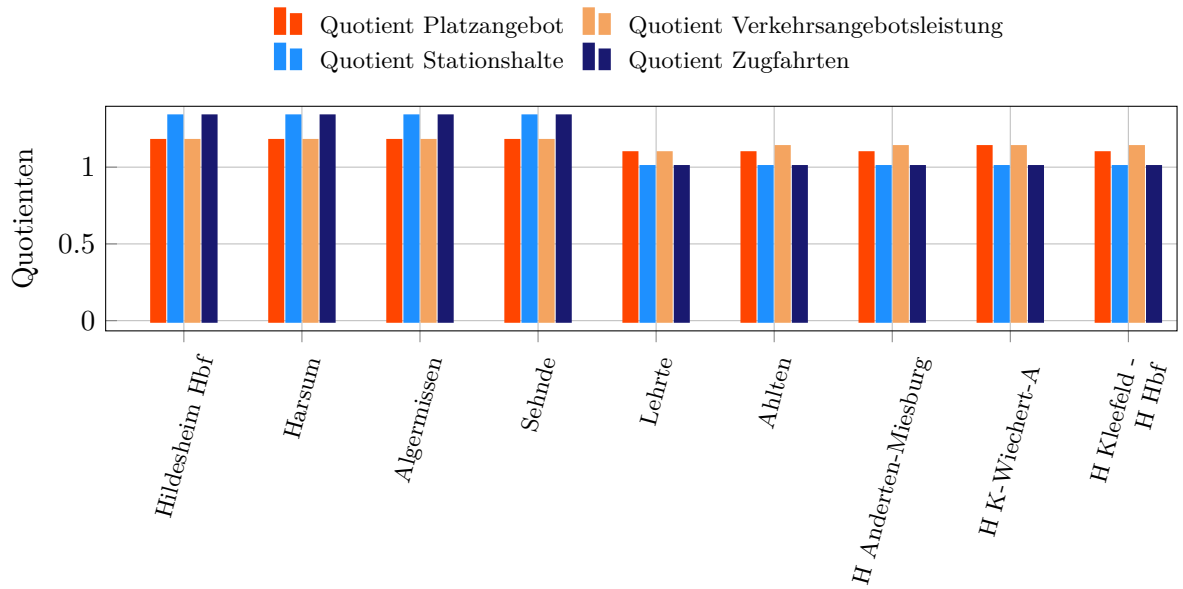

Abbildung A.2.3: Quotienten auf dem Ast Hildesheim Hbf - Hannover Hbf.

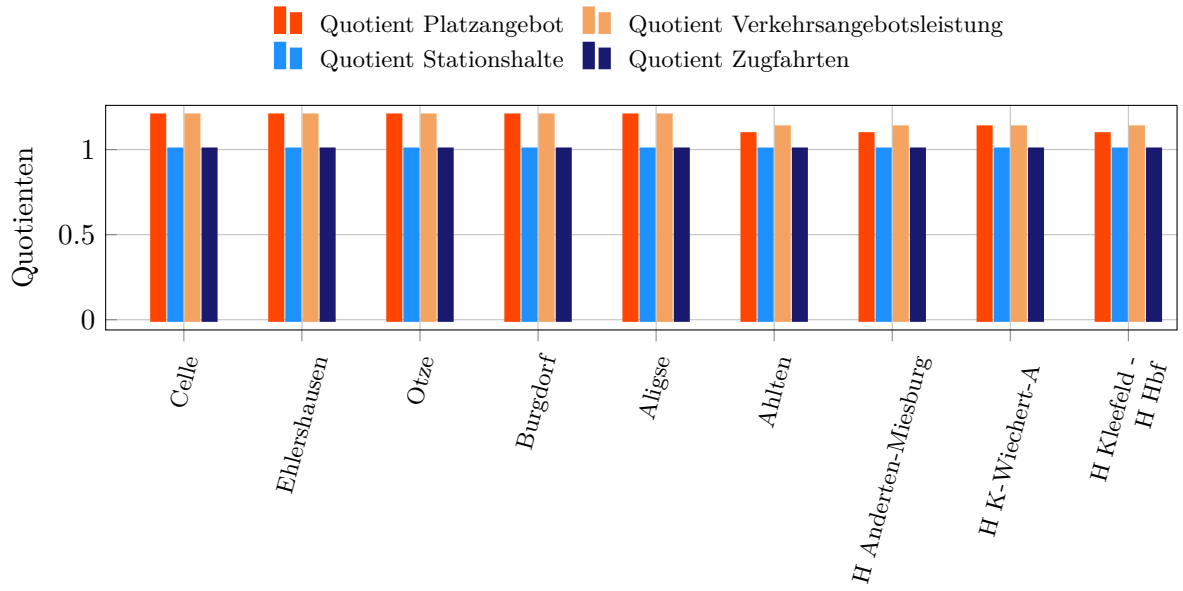

Abbildung A.2.4: Quotienten auf dem Ast Celle - Hannover Hbf.

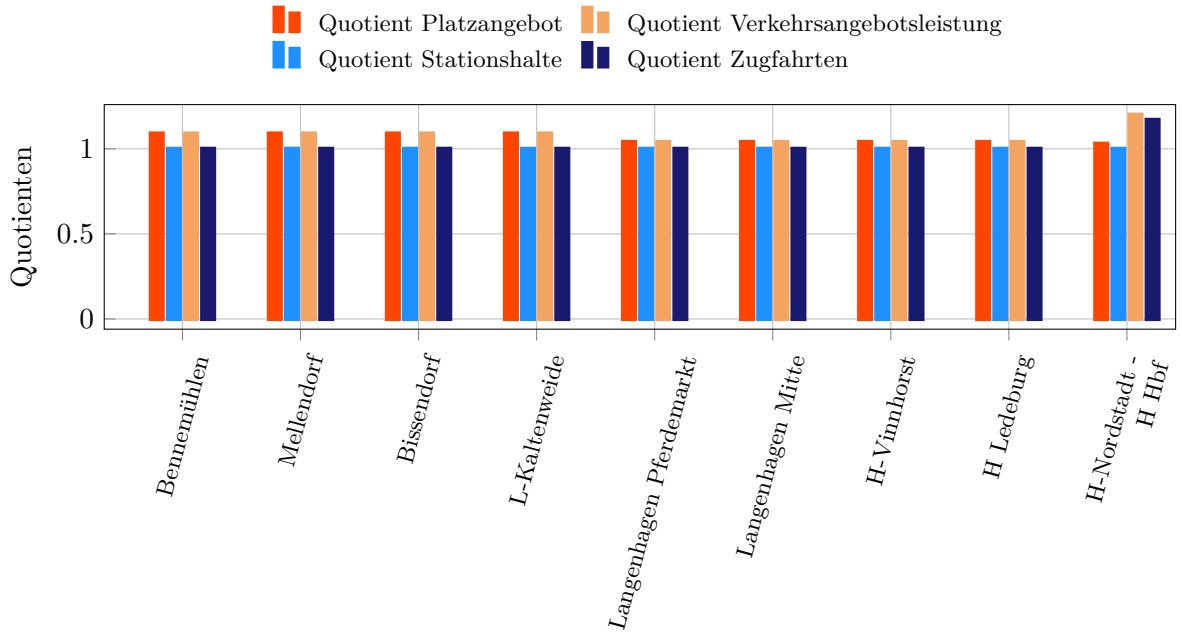

Abbildung A.2.5: Quotienten auf dem Ast Bennemühlen - Hannover Hbf.

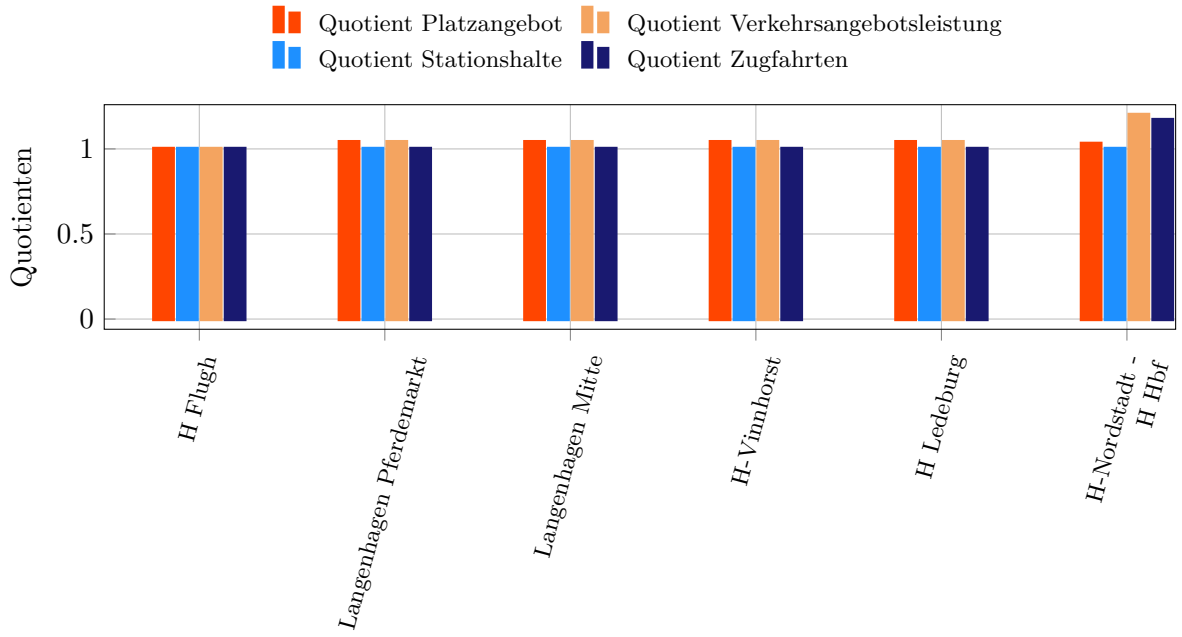

Abbildung A.2.6: Quotienten auf dem Ast Hannover Flughafen - Hannover Hbf.

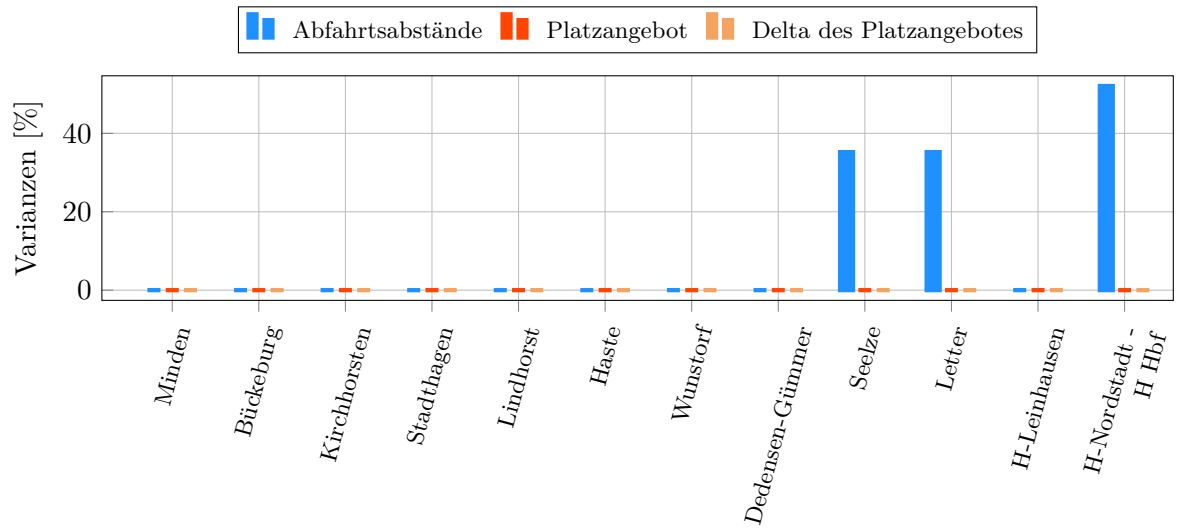

Abbildung A.2.7: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Minden - Hannover Hbf in der HVZ.

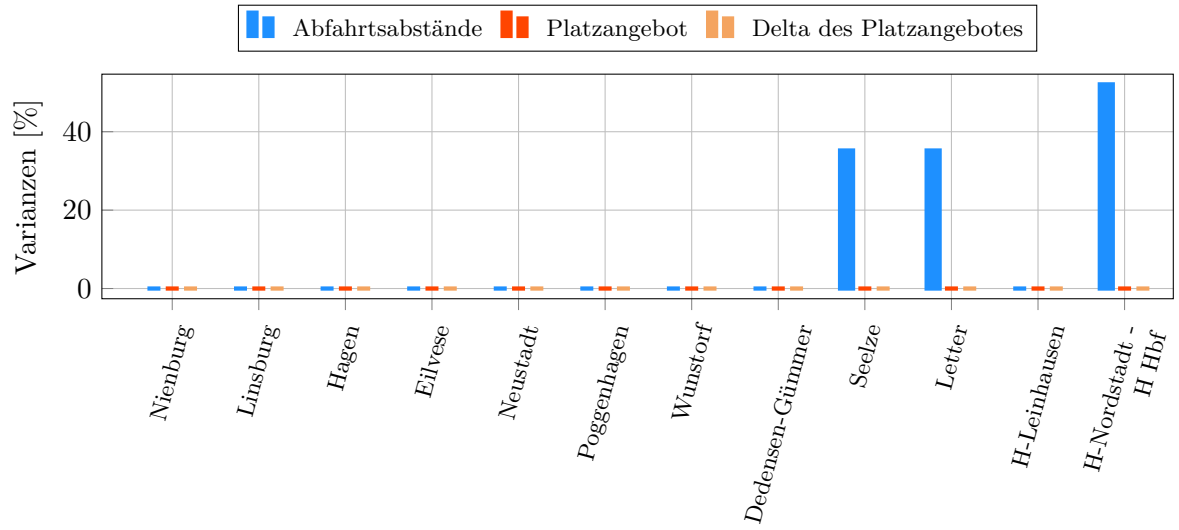

Abbildung A.2.8: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Nienburg - Hannover Hbf in der HVZ.

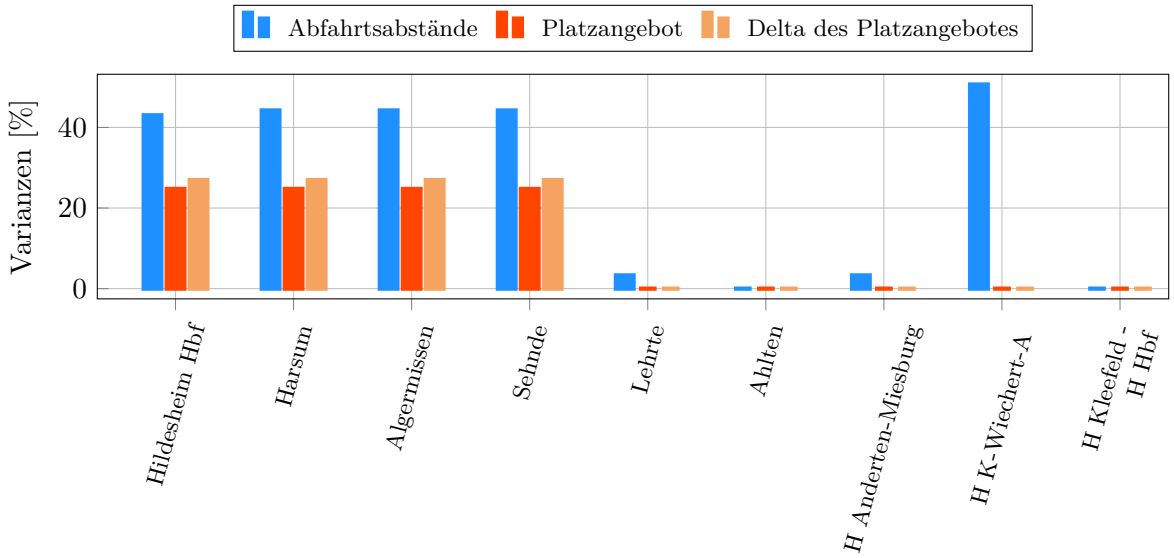

Abbildung A.2.9: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Hildesheim Hbf - Hannover Hbf in der HVZ.

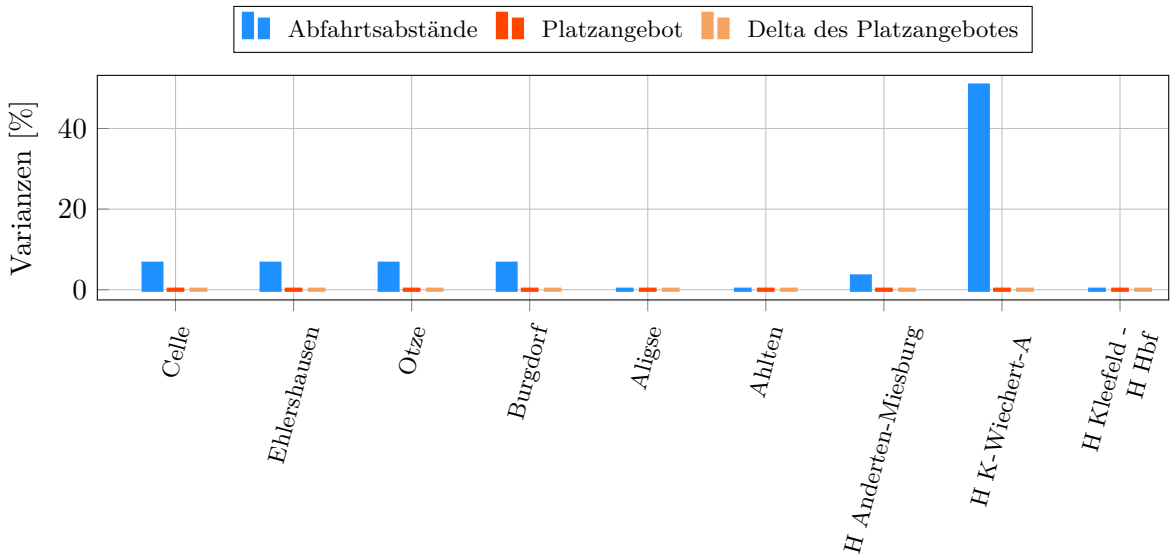

Abbildung A.2.10: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Celle - Hannover Hbf in der HVZ.

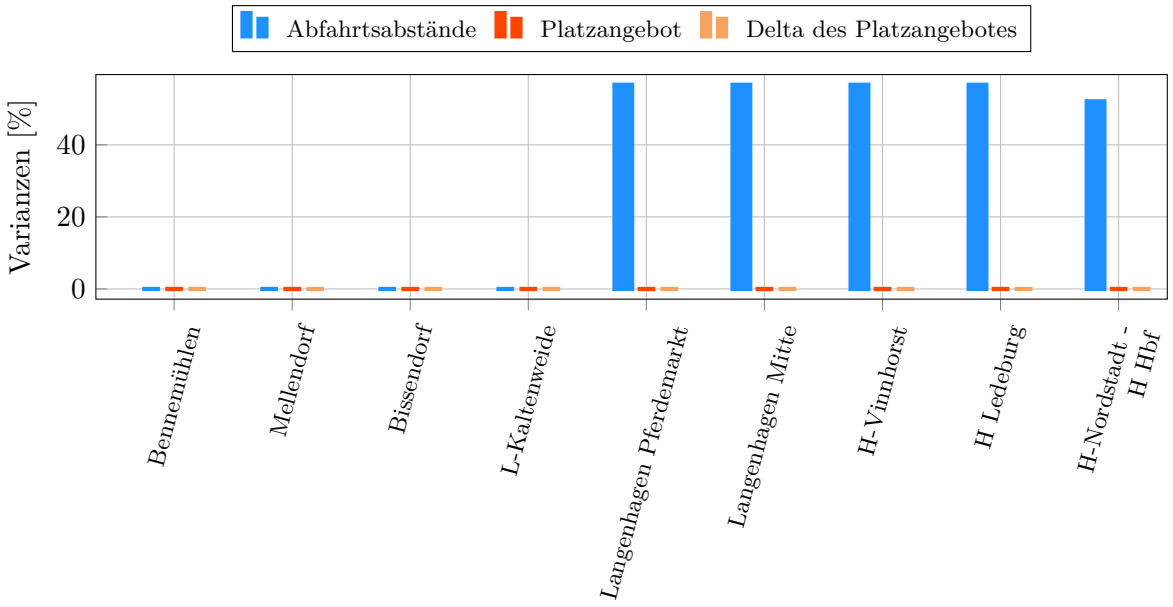

Abbildung A.2.11: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Bennemühlen - Hannover Hbf in der HVZ.

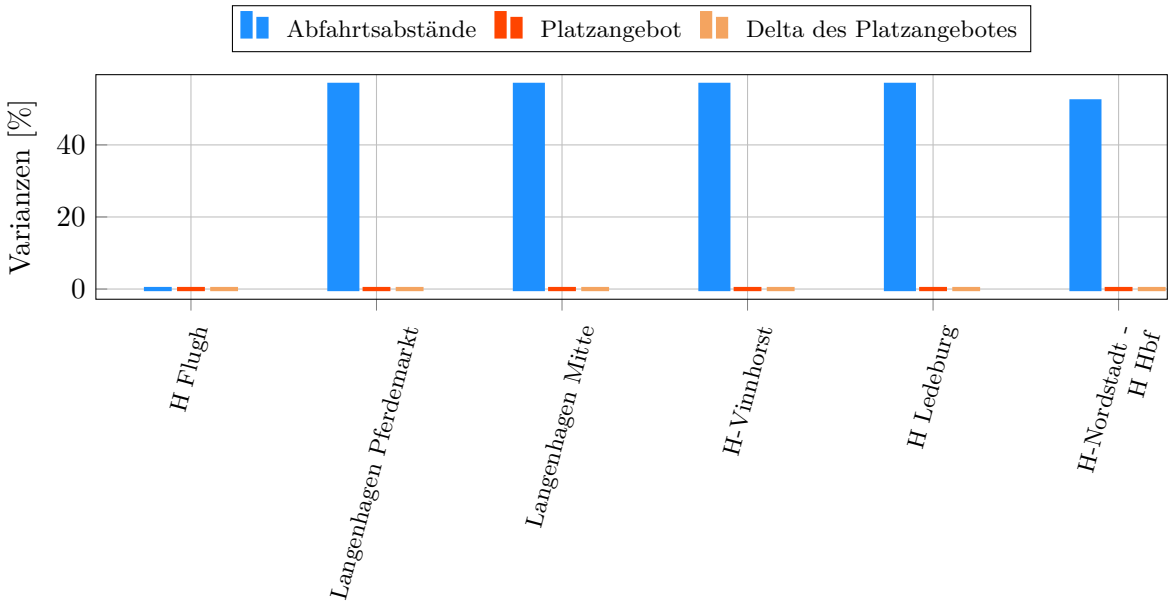

Abbildung A.2.12: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Hannover Flughafen - Hannover Hbf in der HVZ.

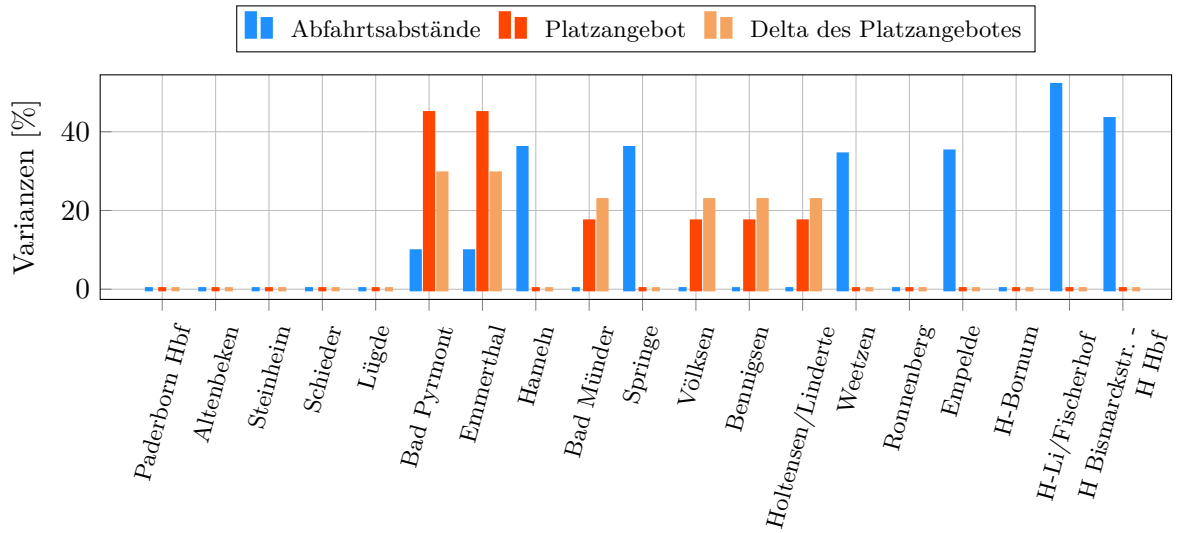

Abbildung A.2.13: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Paderborn Hbf - Hannover Hbf in der HVZ.

A.3. Nahverkehr im Großraum Helsinki

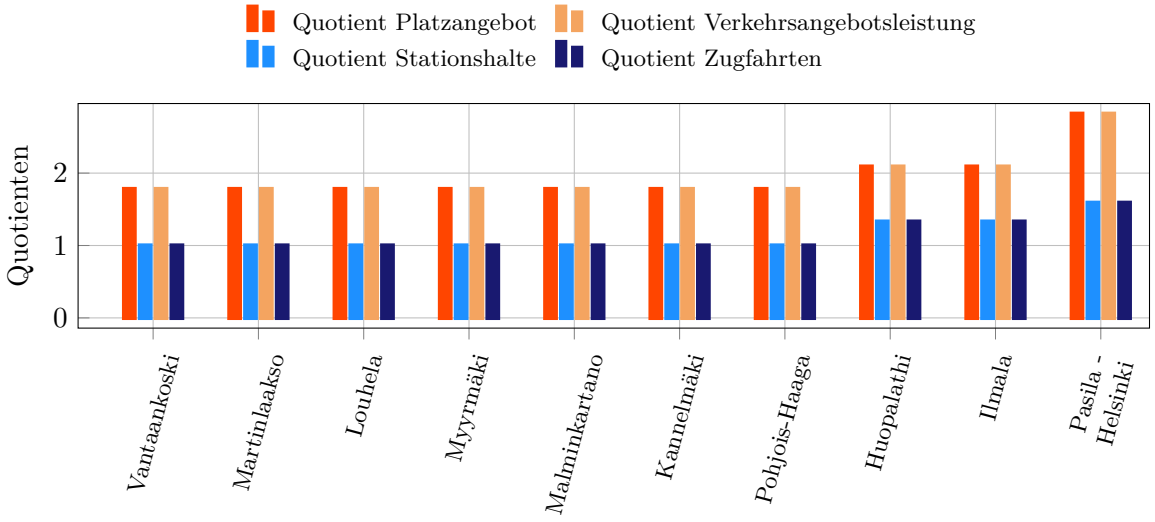

Abbildung A.3.1: Quotienten auf dem Ast Vantaankoski - Helsinki.

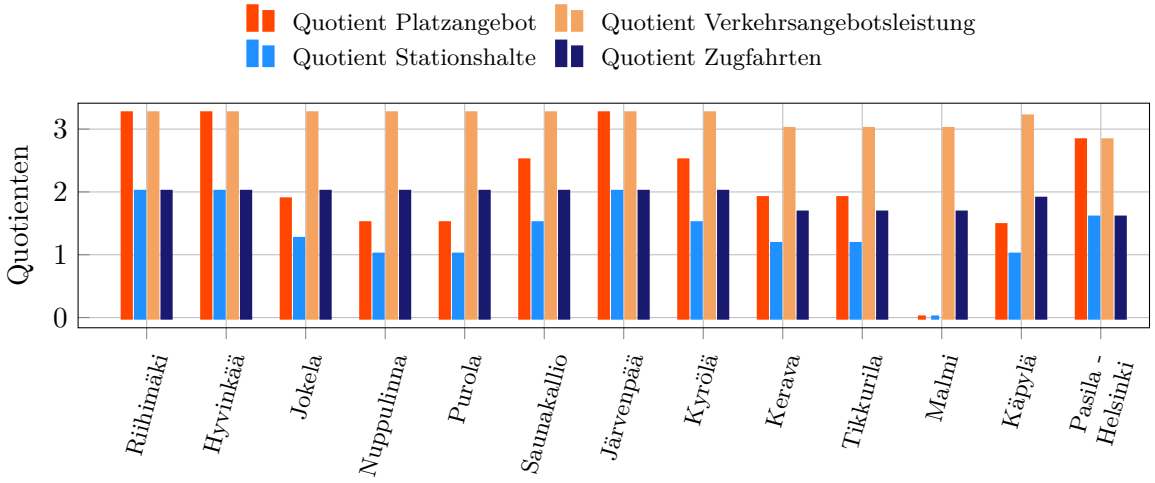

Abbildung A.3.2: Quotienten auf dem Ast Riihimäki - Helsinki.

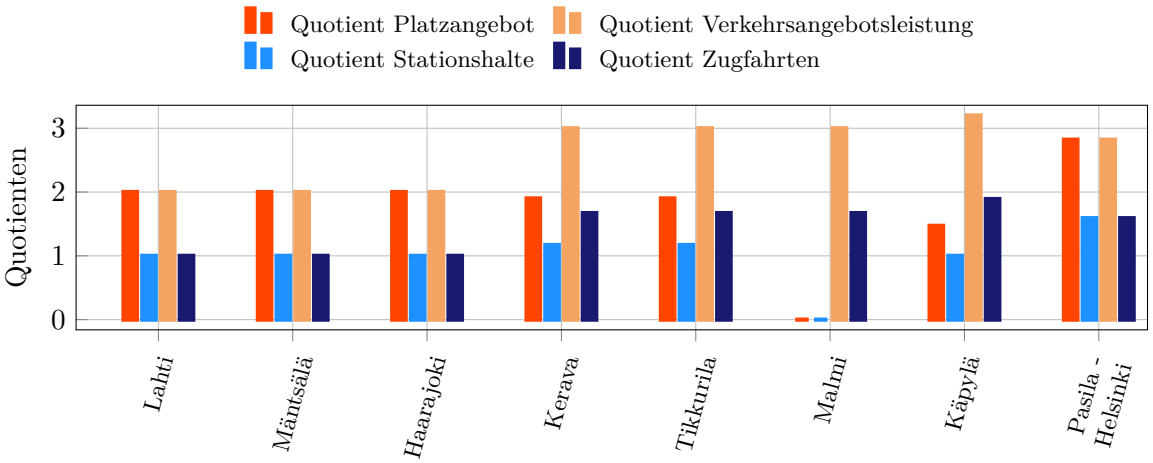

Abbildung A.3.3: Quotienten auf dem Ast Lahti - Helsinki.

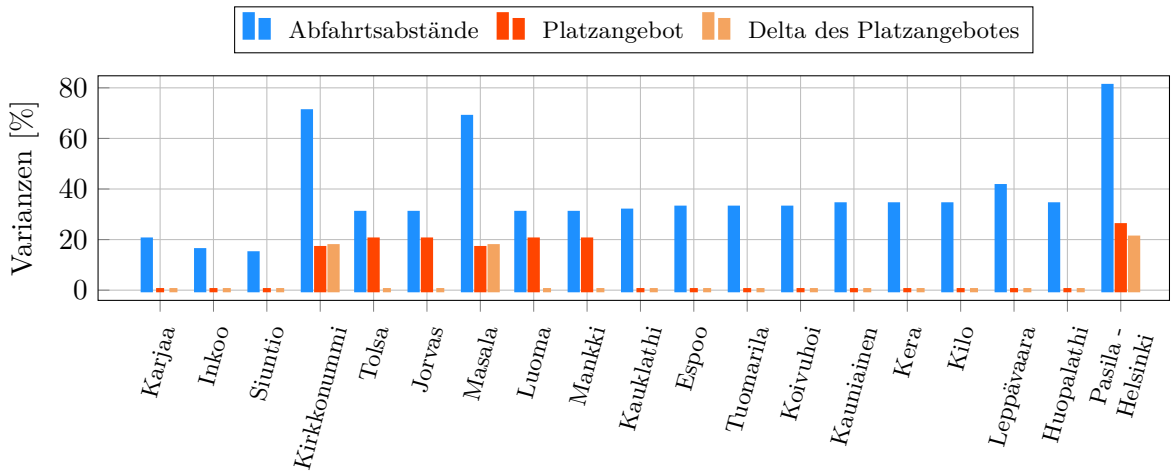

Abbildung A.3.4: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Karjaa - Helsinki in der HVZ.

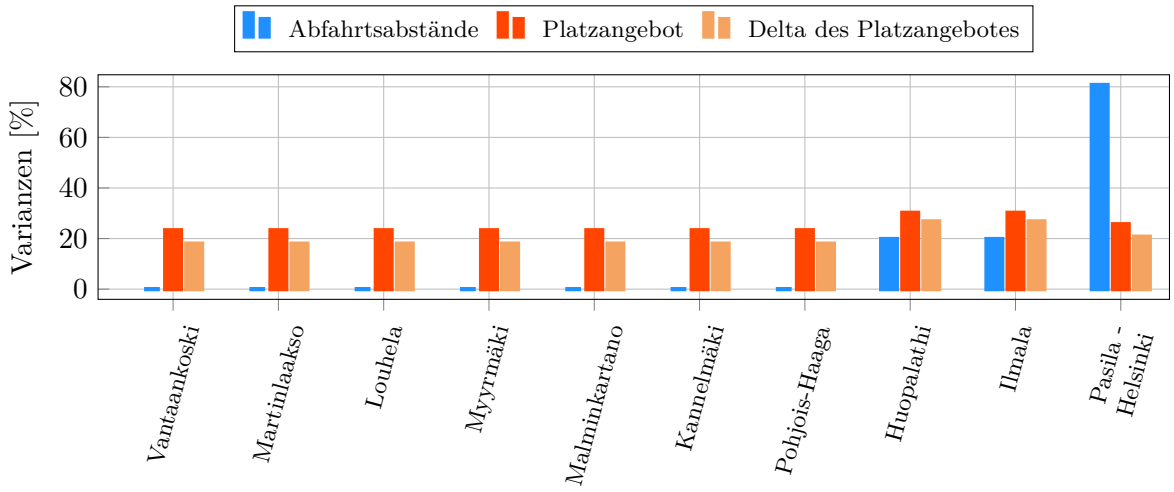

Abbildung A.3.5: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Vantaankoski - Helsinki in der HVZ.

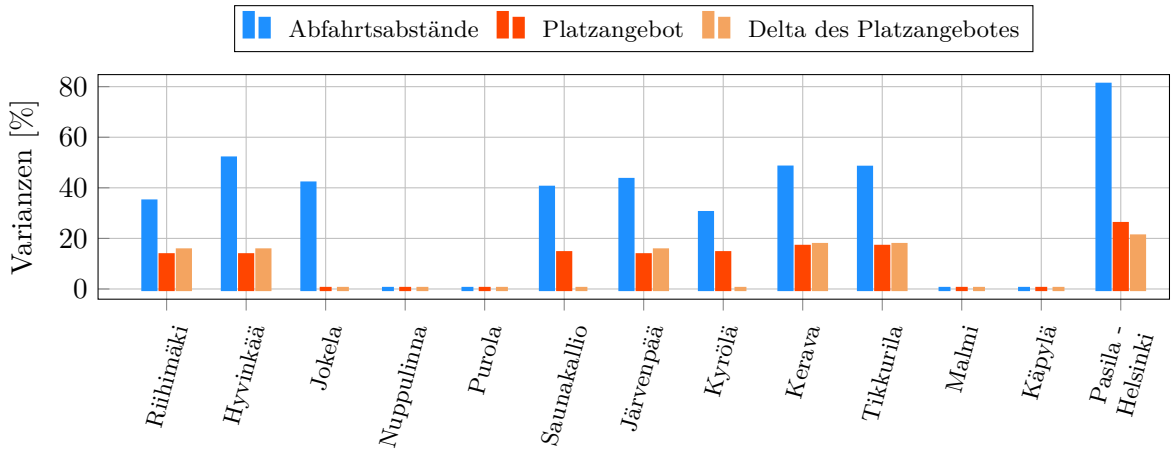

Abbildung A.3.6: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Riihimäki - Helsinki in der HVZ.

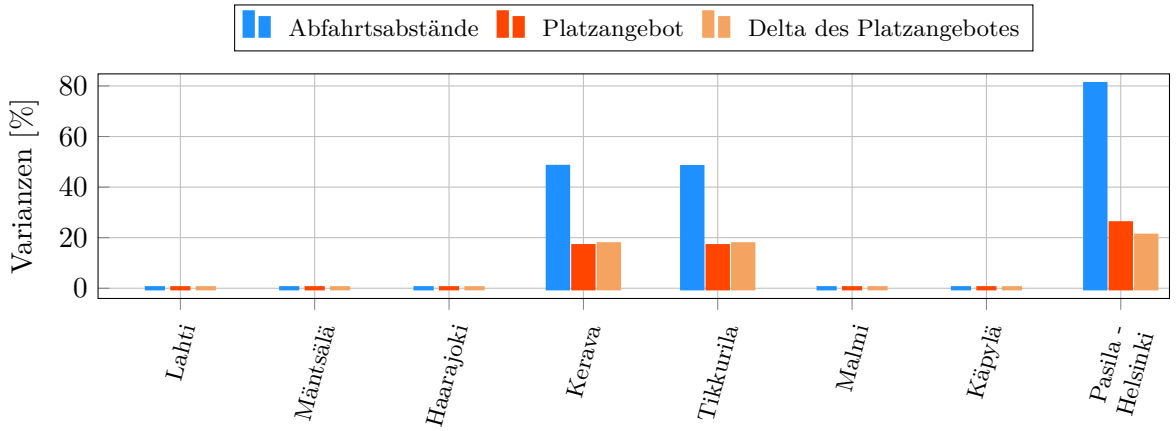

Abbildung A.3.7: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Lahti - Helsinki in der HVZ.

A.4. DSB S-tog Kopenhagen

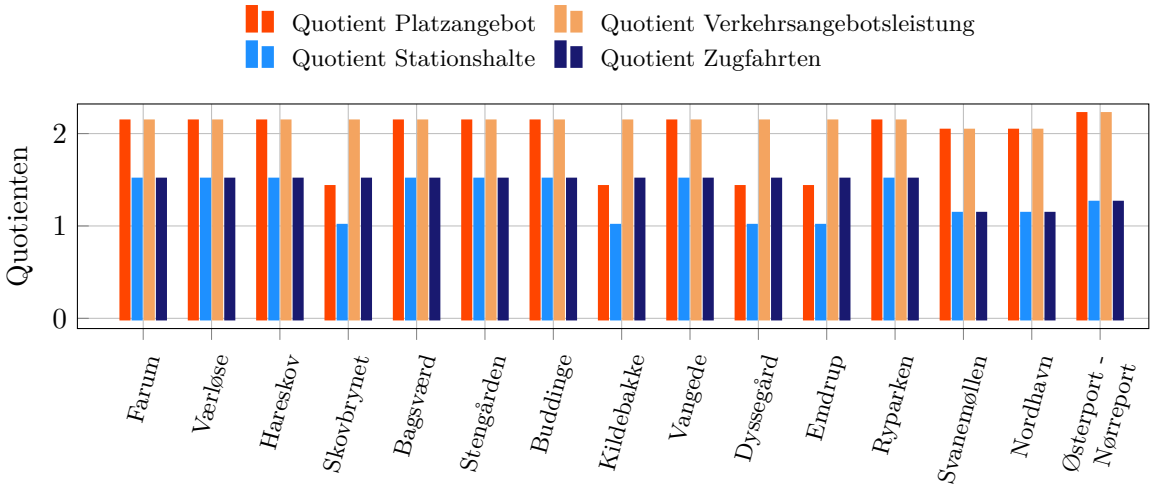

Abbildung A.4.1: Quotienten auf dem Ast Farum - Nørreport.

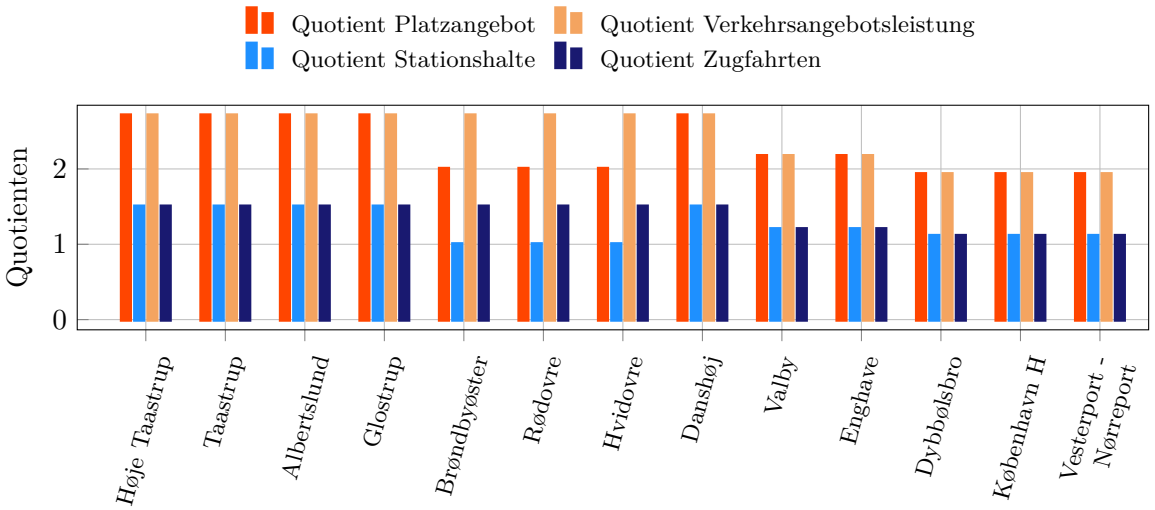

Abbildung A.4.2: Quotienten auf dem Ast Høje Taastrup - Nørreport.

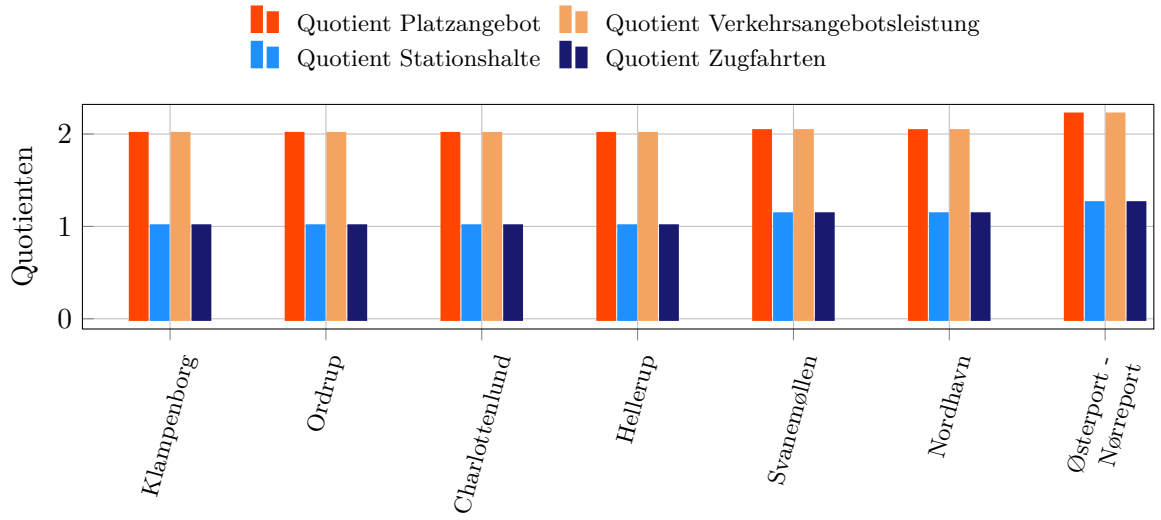

Abbildung A.4.3: Quotienten auf dem Ast Klampenborg - Nørreport.

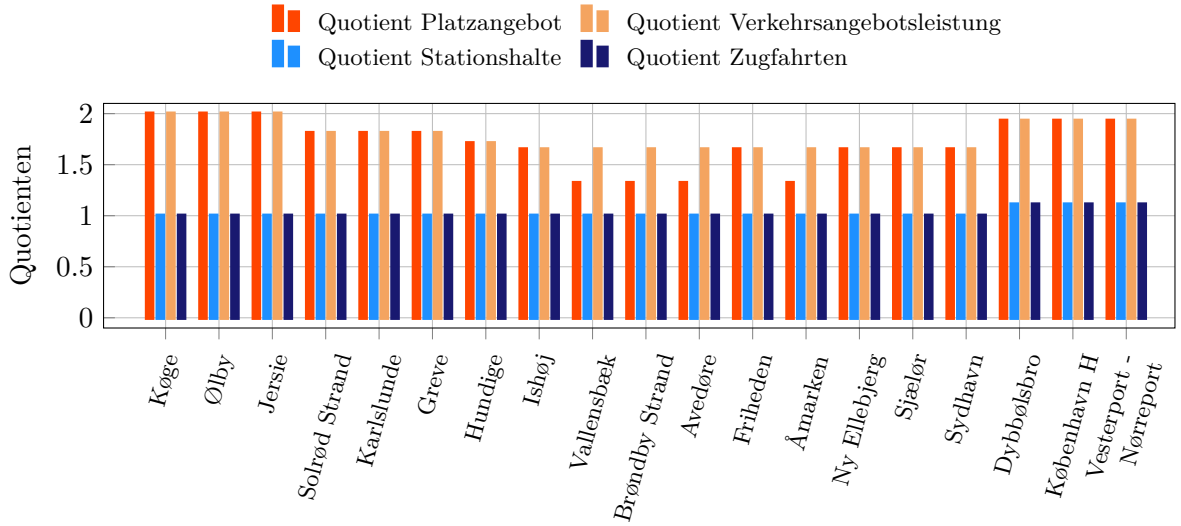

Abbildung A.4.4: Quotienten auf dem Ast Køge - Nørreport.

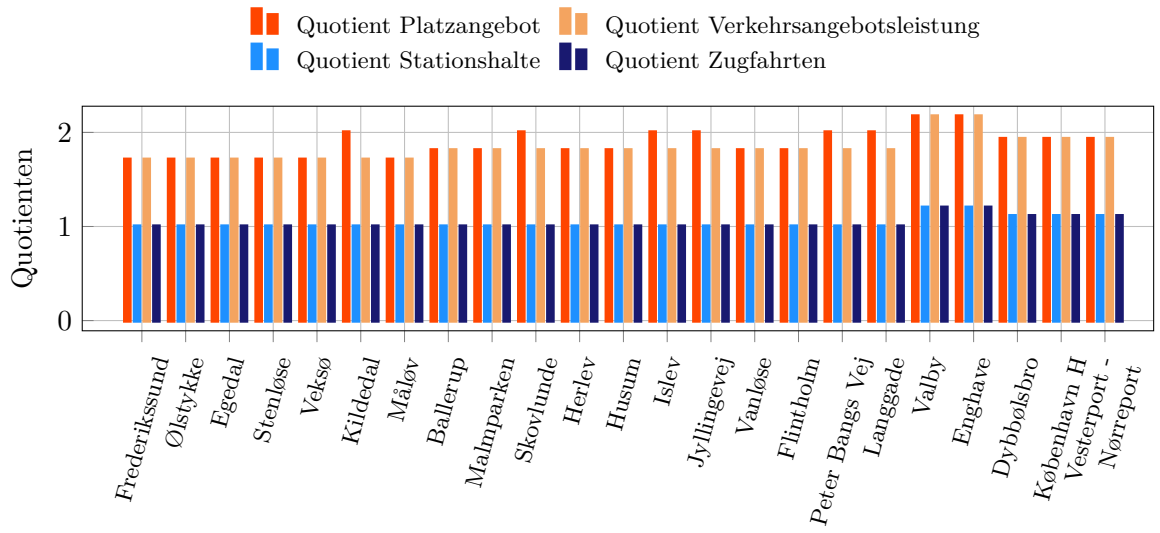

Abbildung A.4.5: Quotienten auf dem Ast Frederikssund - Nørreport.

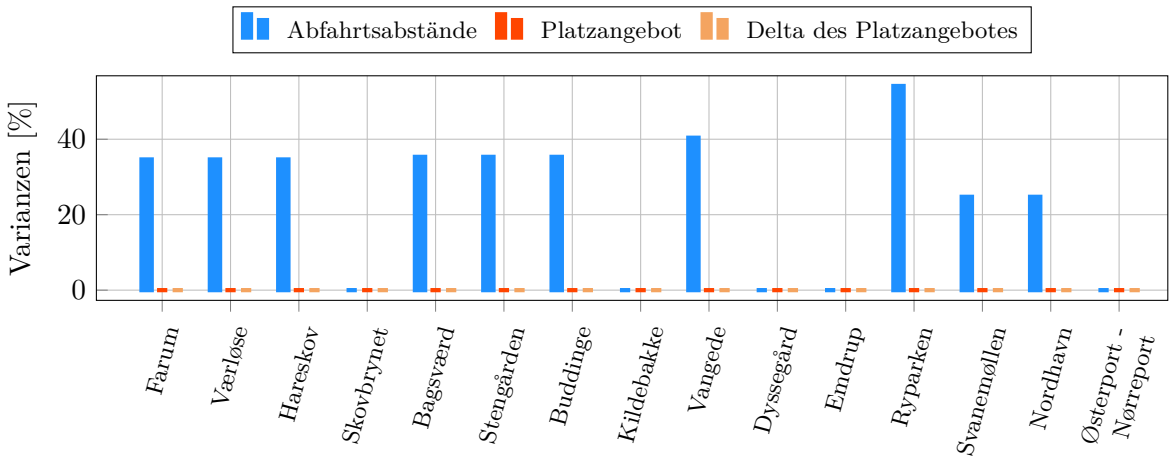

Abbildung A.4.6: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Farum - Nørreport in der HVZ.

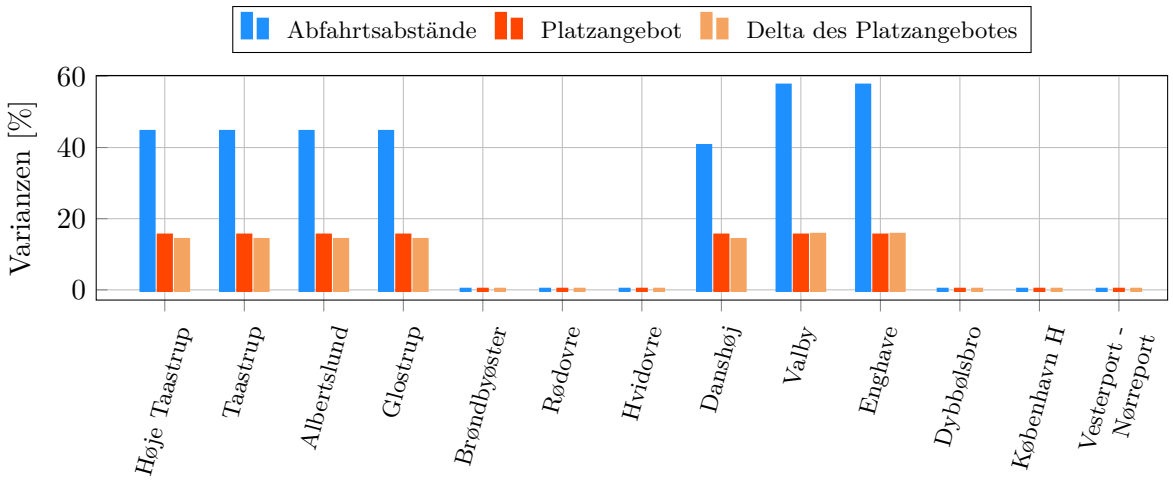

Abbildung A.4.7: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Høje Taastrup - Nørreport in der HVZ.

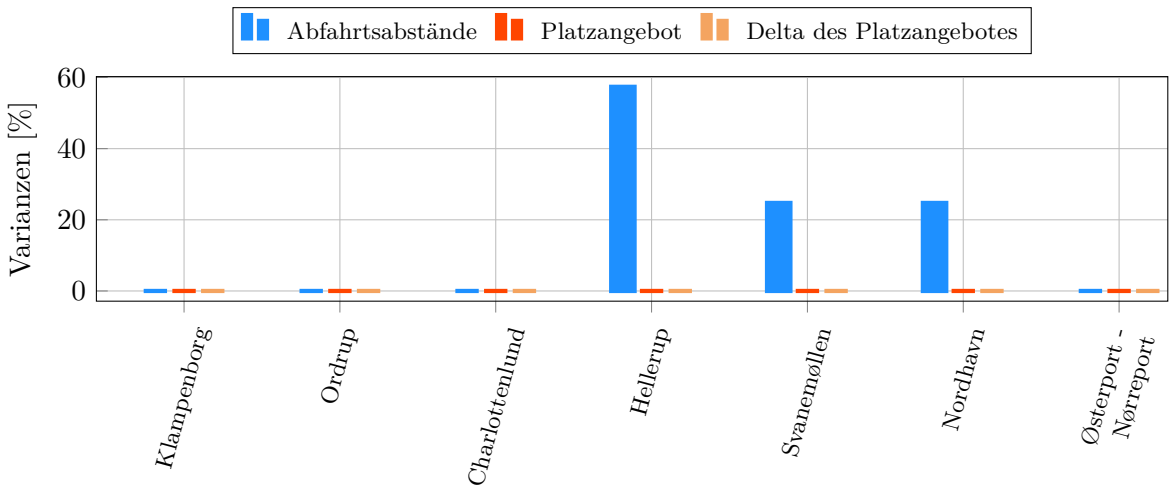

Abbildung A.4.8: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Klampenborg - Nørreport in der HVZ.

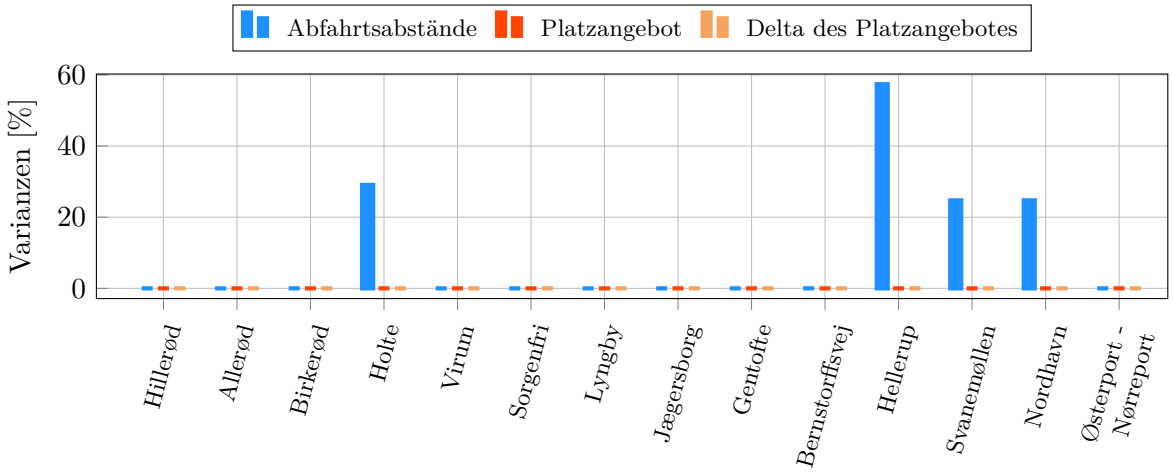

Abbildung A.4.9: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Hillerød - Nørreport in der HVZ.

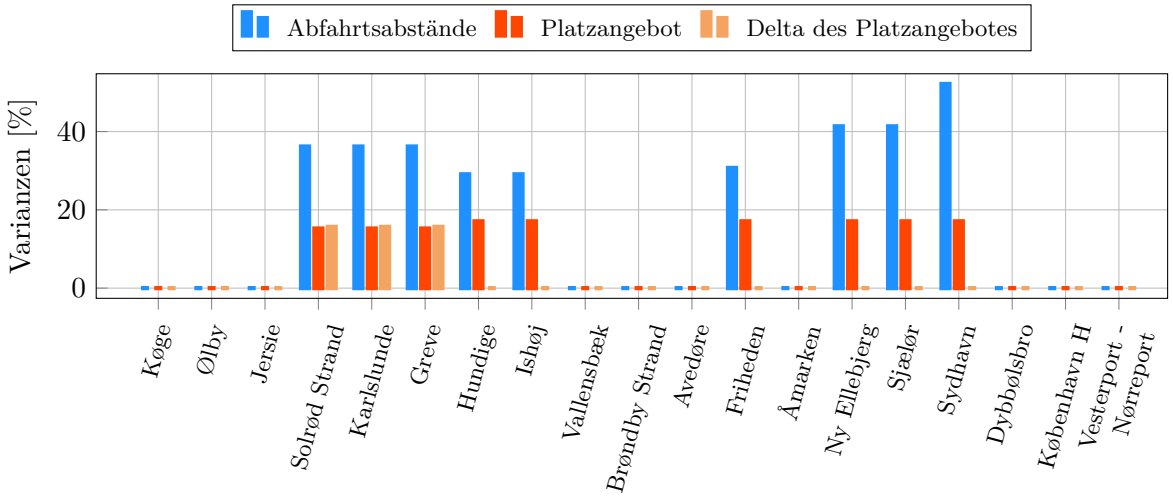

Abbildung A.4.10: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Køge - Nørreport in der HVZ.

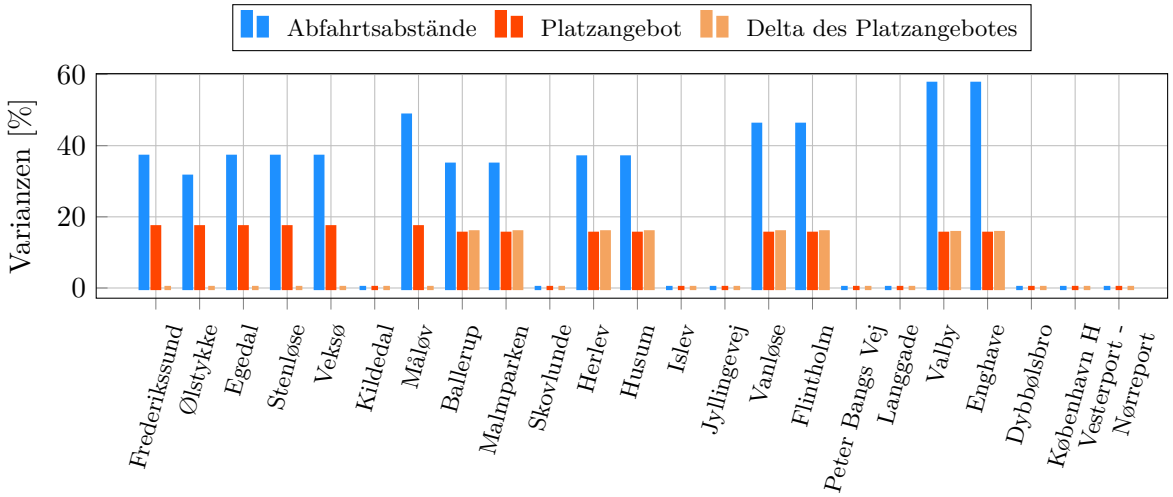

Abbildung A.4.11: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Frederikssund - Nørreport in der HVZ.

A.5. S-Bahn München

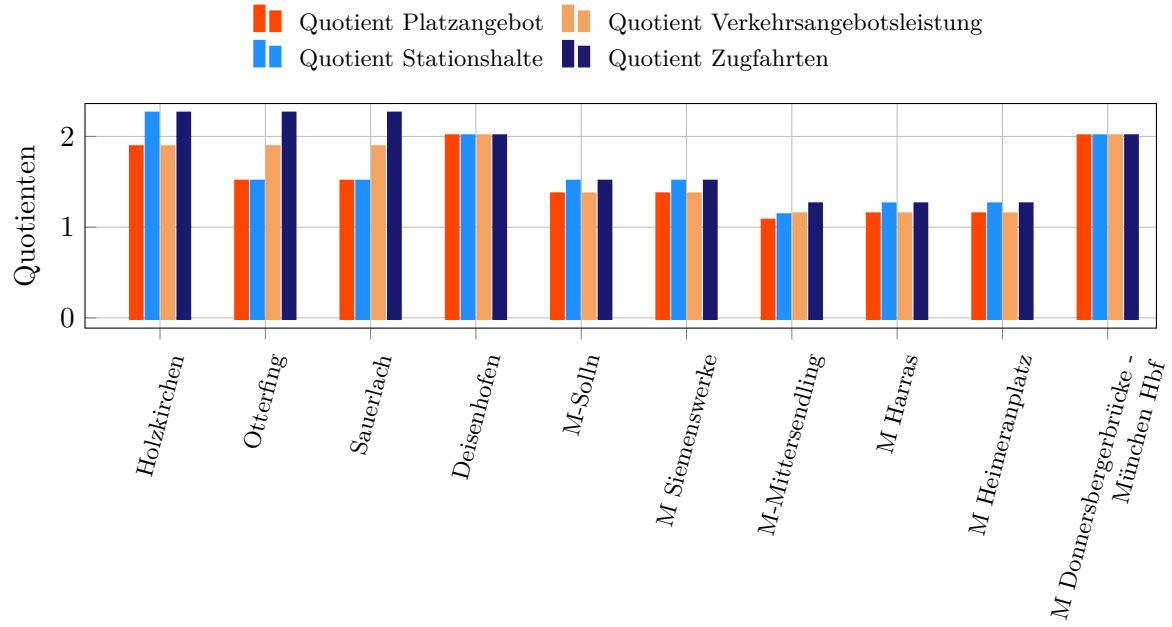

Abbildung A.5.1: Quotienten auf dem Ast Holzkirchen - München Hbf.

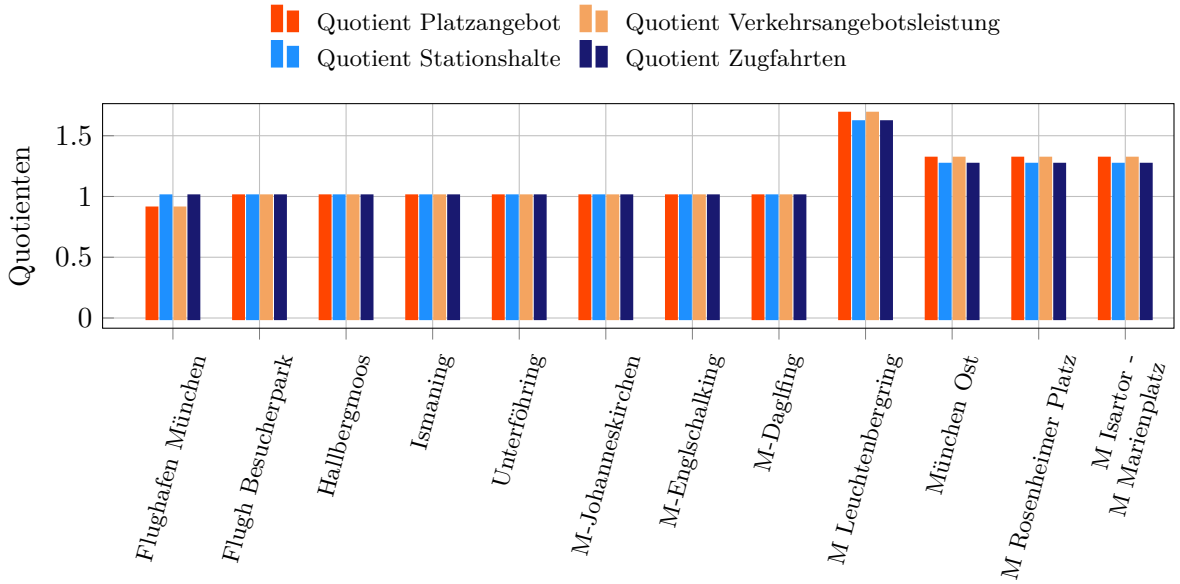

Abbildung A.5.2: Quotienten auf dem Ast Flughafen München - München Marienplatz.

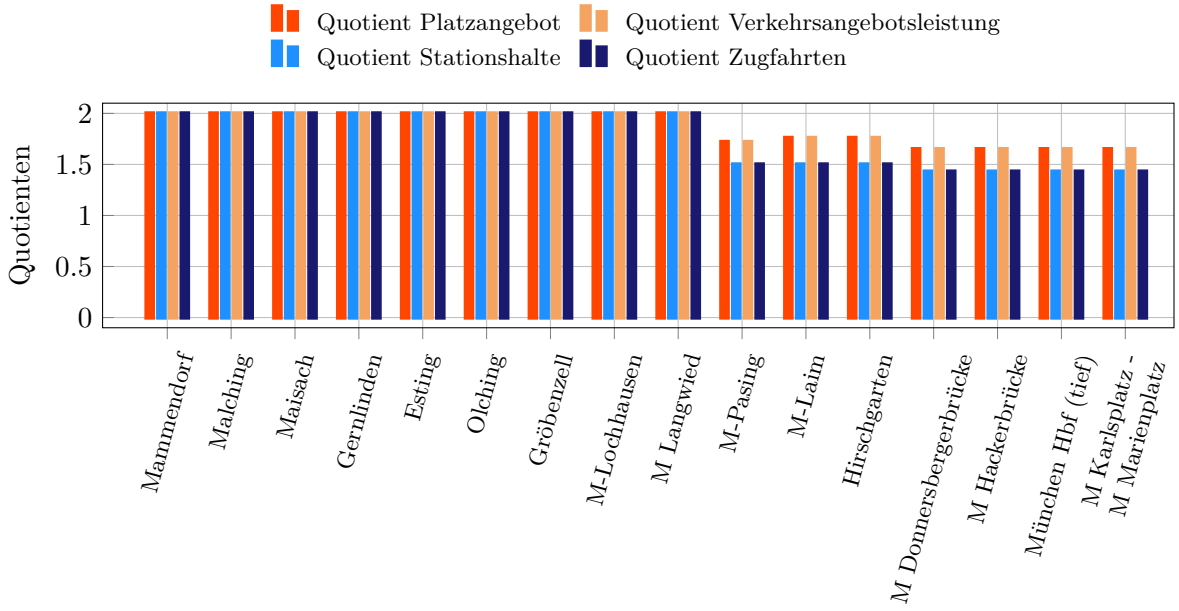

Abbildung A.5.3: Quotienten auf dem Ast Mammendorf - München Marienplatz.

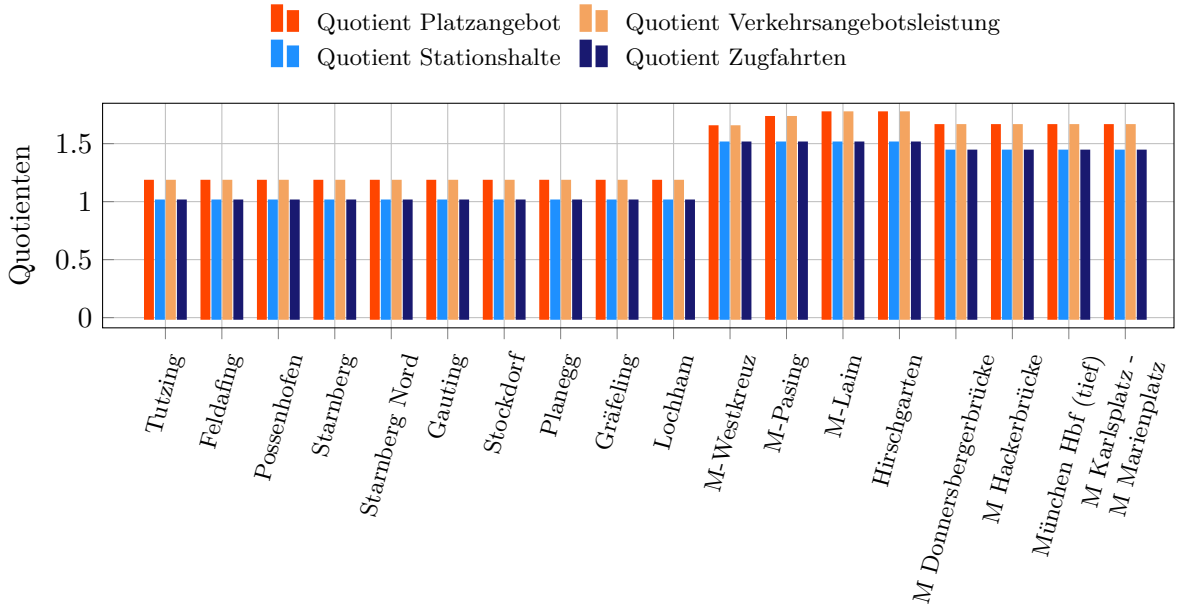

Abbildung A.5.4: Quotienten auf dem Ast Tutzing - München Marienplatz.

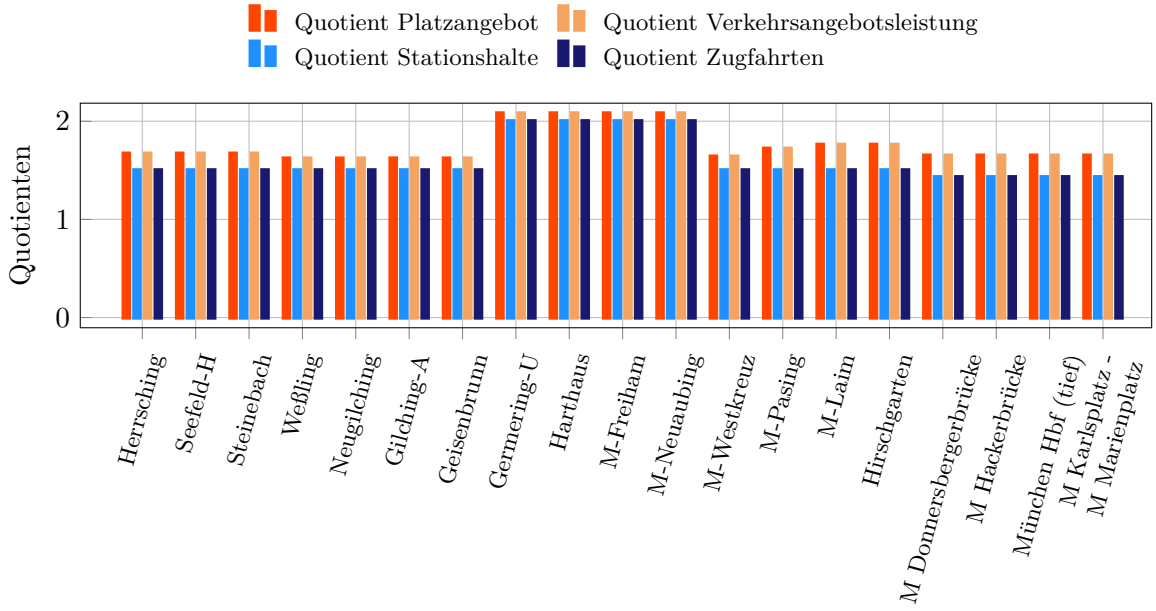

Abbildung A.5.5: Quotienten auf dem Ast Herrsching - München Marienplatz.

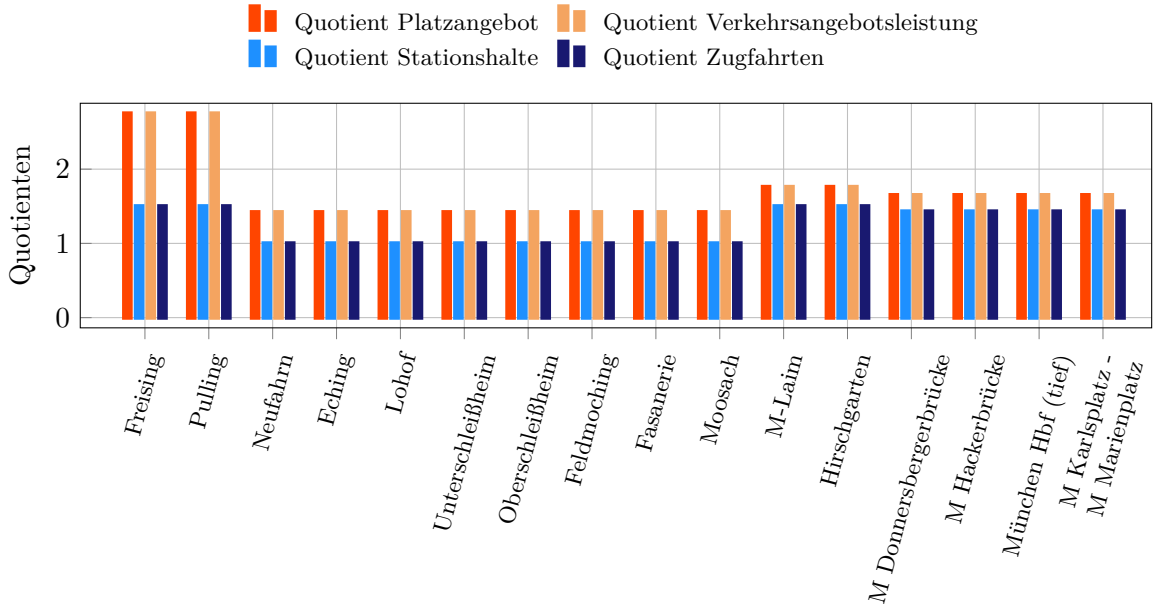

Abbildung A.5.6: Quotienten auf dem Ast Freising - München Marienplatz.

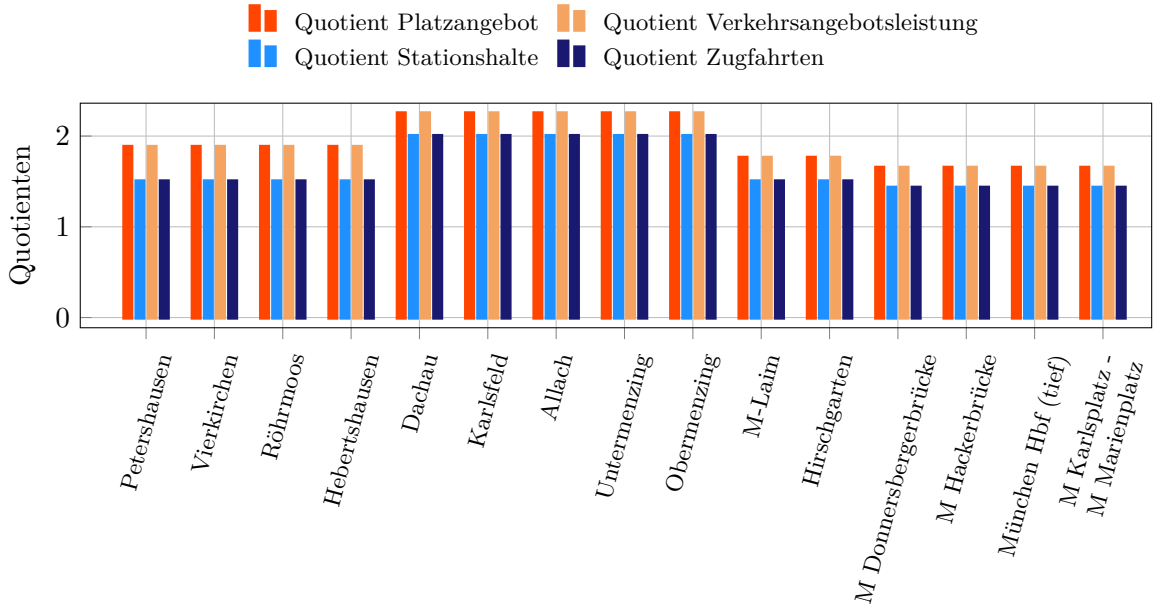

Abbildung A.5.7: Quotienten auf dem Ast Petershausen - München Marienplatz.

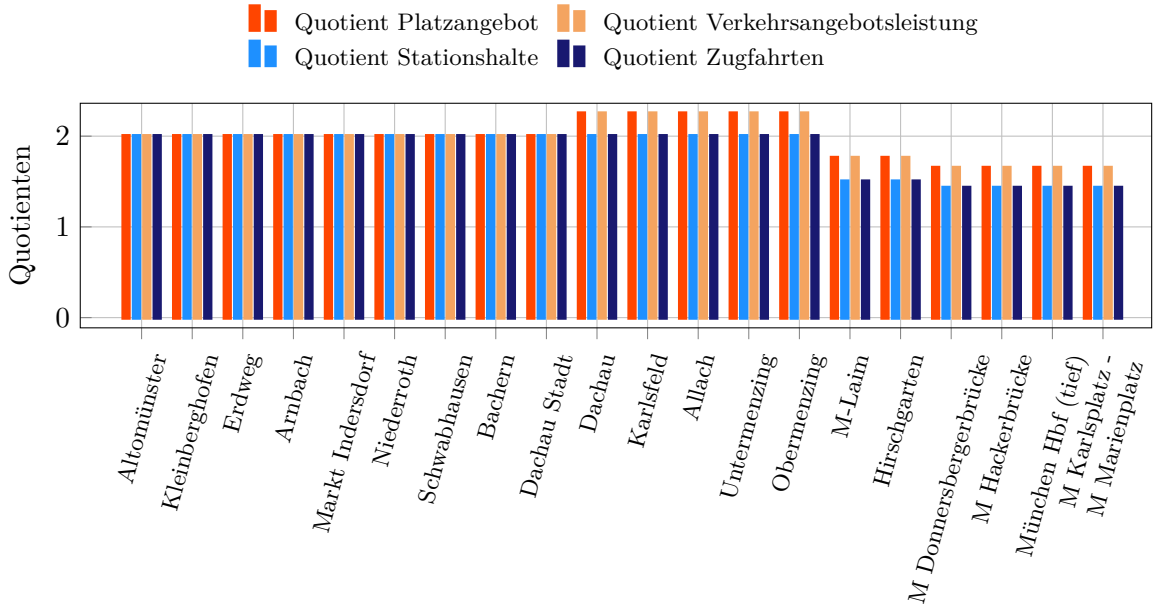

Abbildung A.5.8: Quotienten auf dem Ast Altomünster - München Marienplatz.

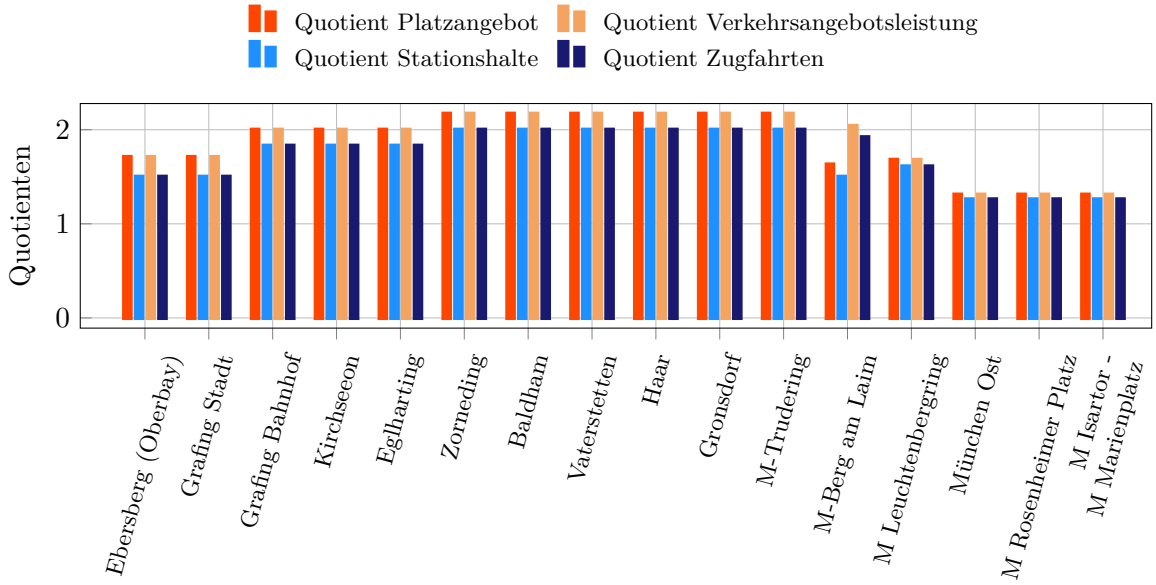

Abbildung A.5.9: Quotienten auf dem Ast Ebersberg (Oberbay) - München Marienplatz.

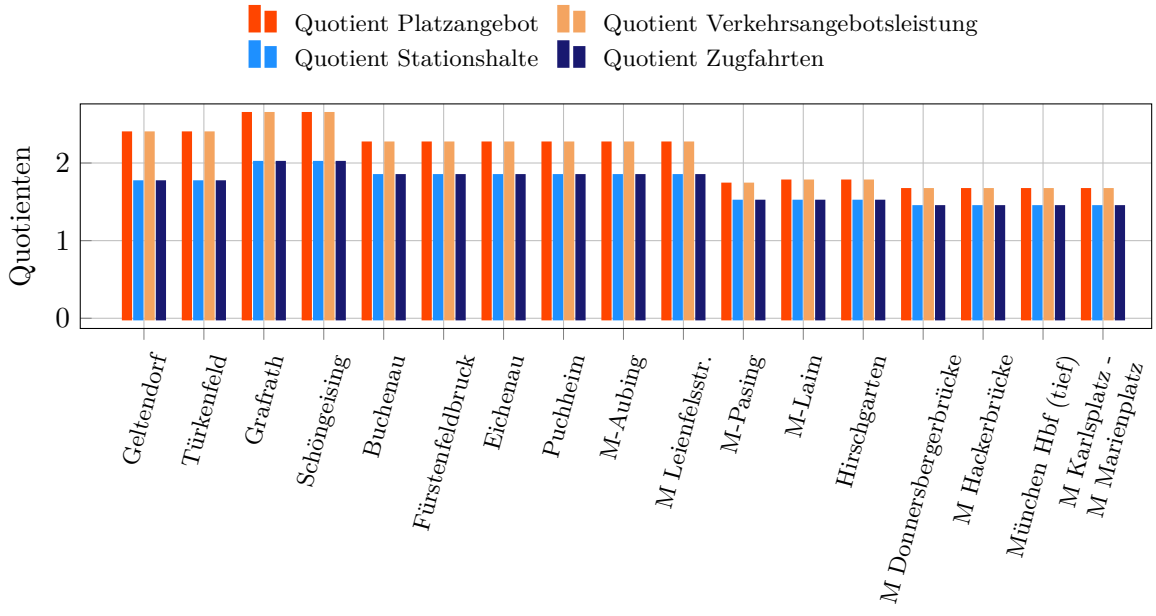

Abbildung A.5.10: Quotienten auf dem Ast Geltendorf - München Marienplatz.

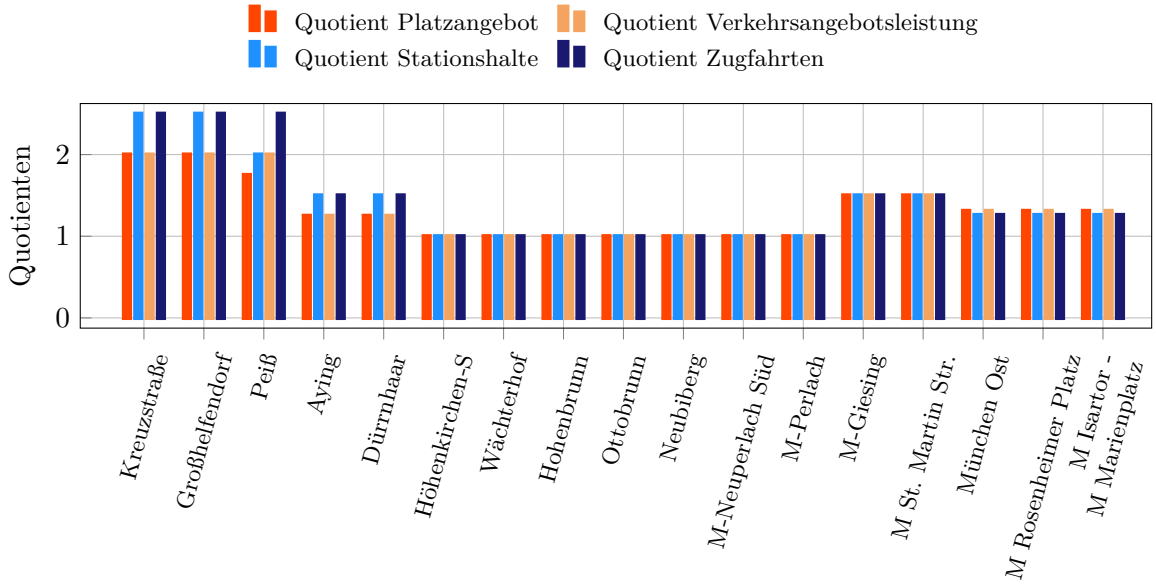

Abbildung A.5.11: Quotienten auf dem Ast Kreuzstraße - München Marienplatz.

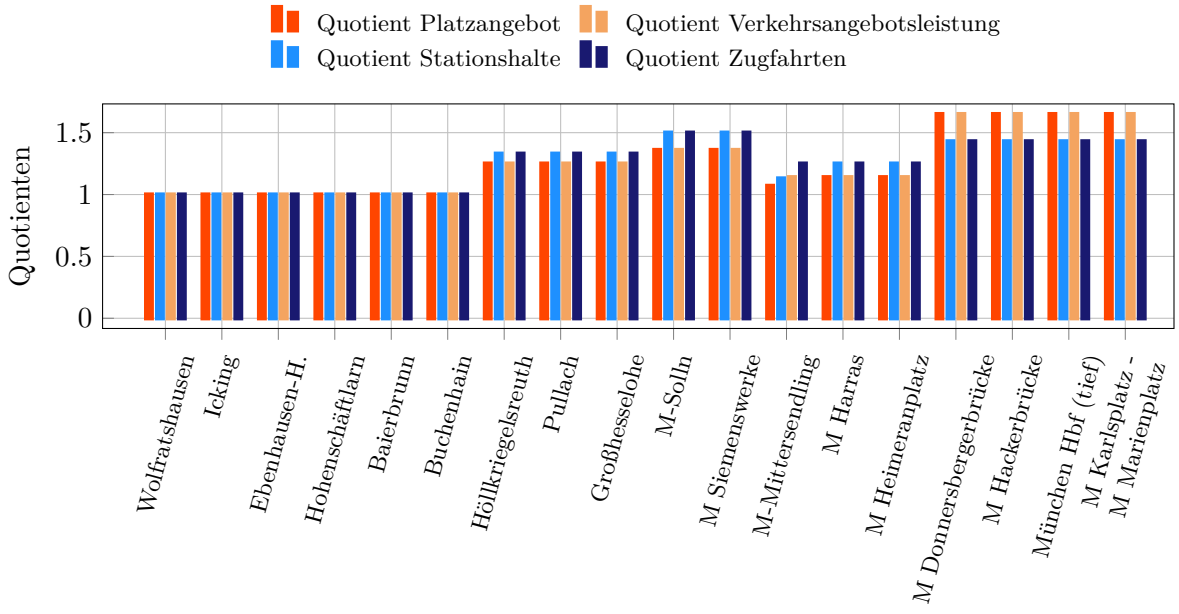

Abbildung A.5.12: Quotienten auf dem Ast Wolfratshausen - München Marienplatz.

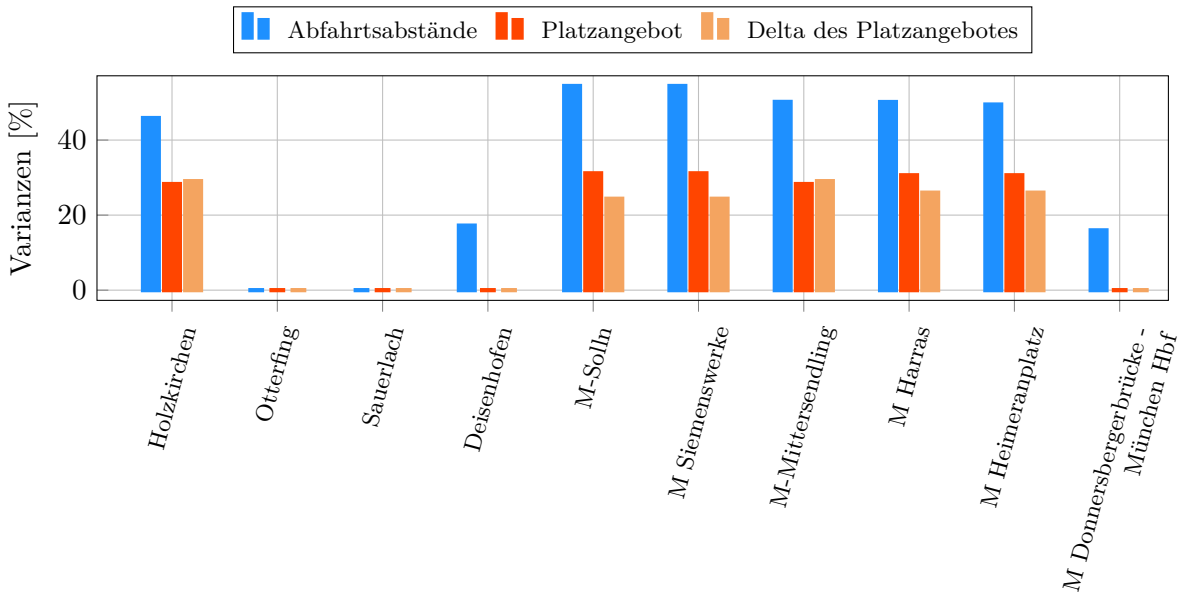

Abbildung A.5.13: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Holzkirchen - München Hbf in der HVZ.

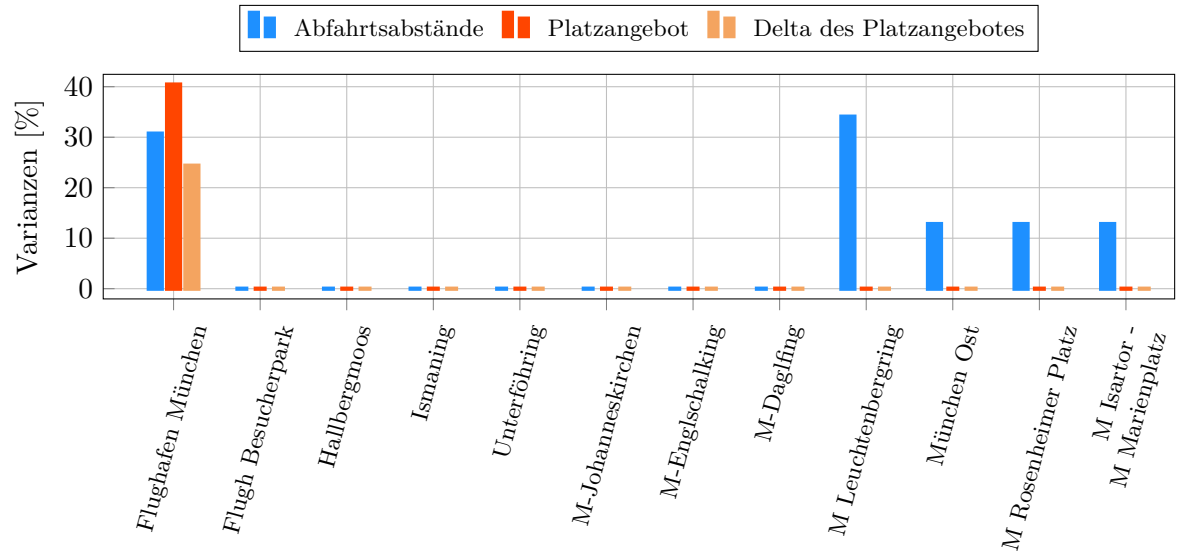

Abbildung A.5.14: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Flughafen München - München Marienplatz in der HVZ.

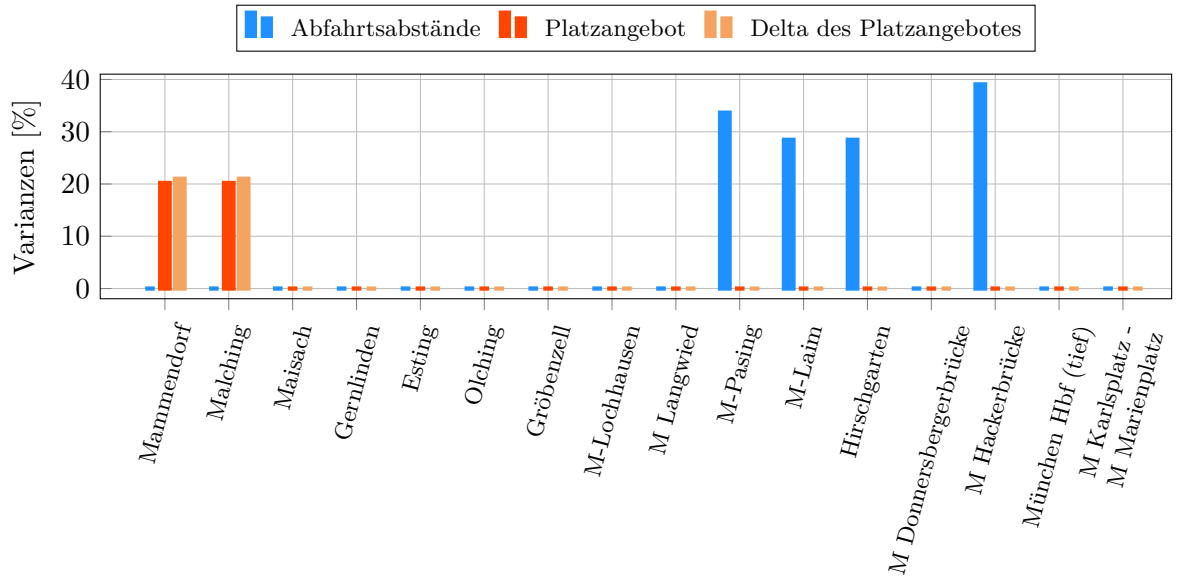

Abbildung A.5.15: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Mammendorf - München Marienplatz in der HVZ.

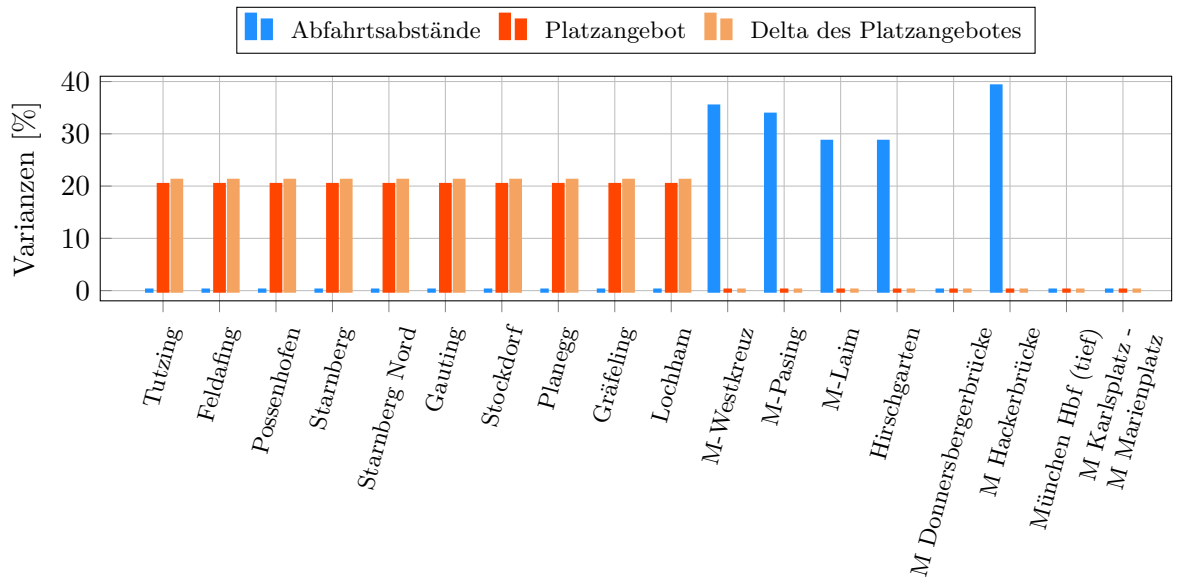

Abbildung A.5.16: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Tutzing - München Marienplatz in der HVZ.

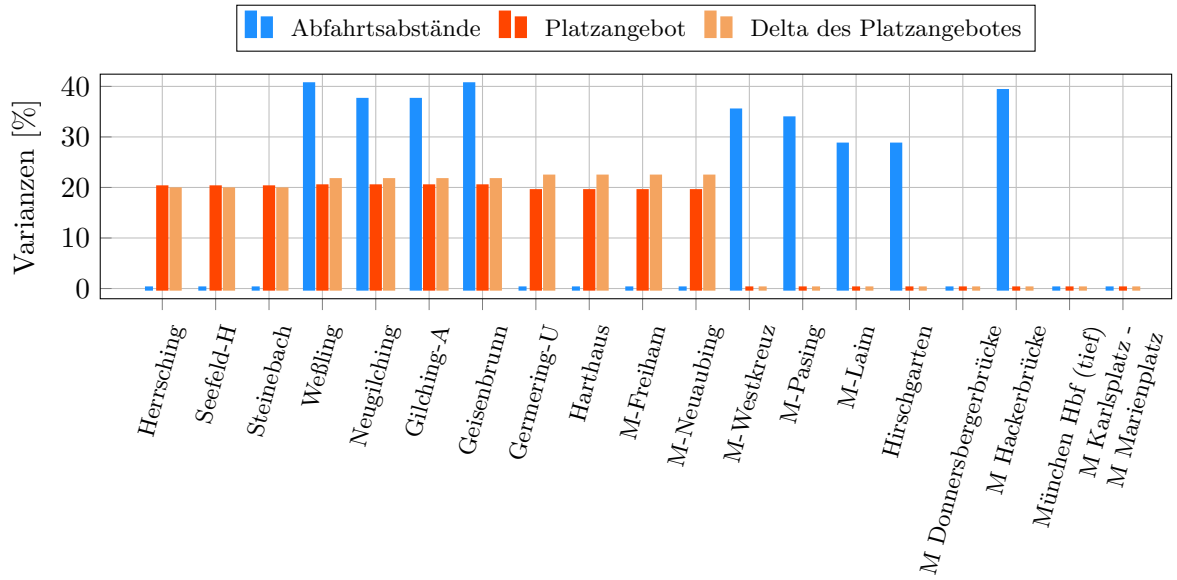

Abbildung A.5.17: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Herrsching - München Marienplatz in der HVZ.

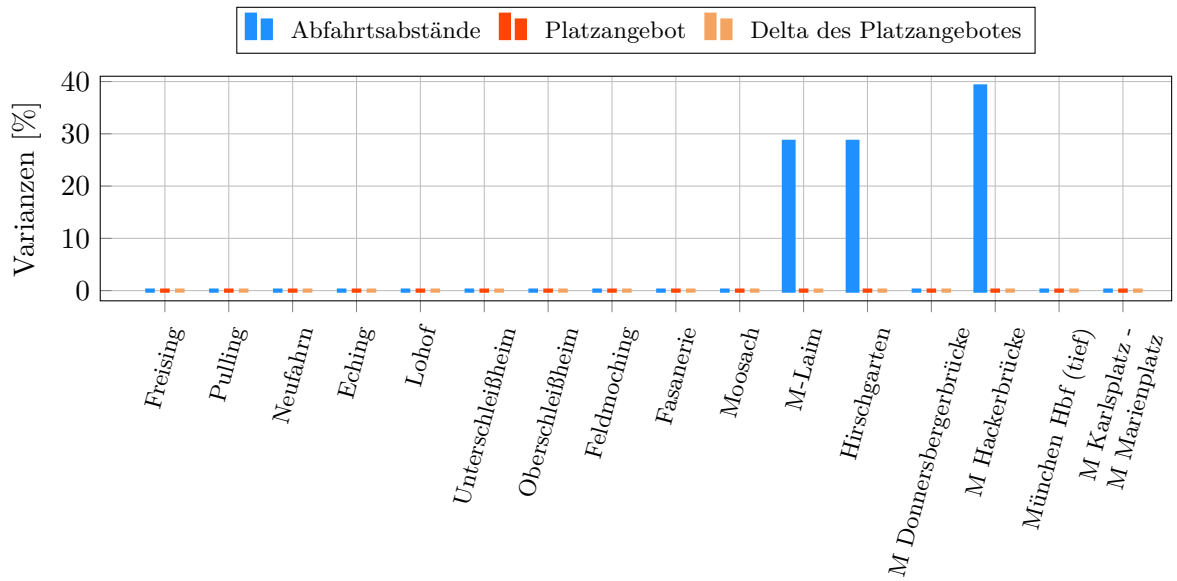

Abbildung A.5.18: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Freising - München Marienplatz in der HVZ.

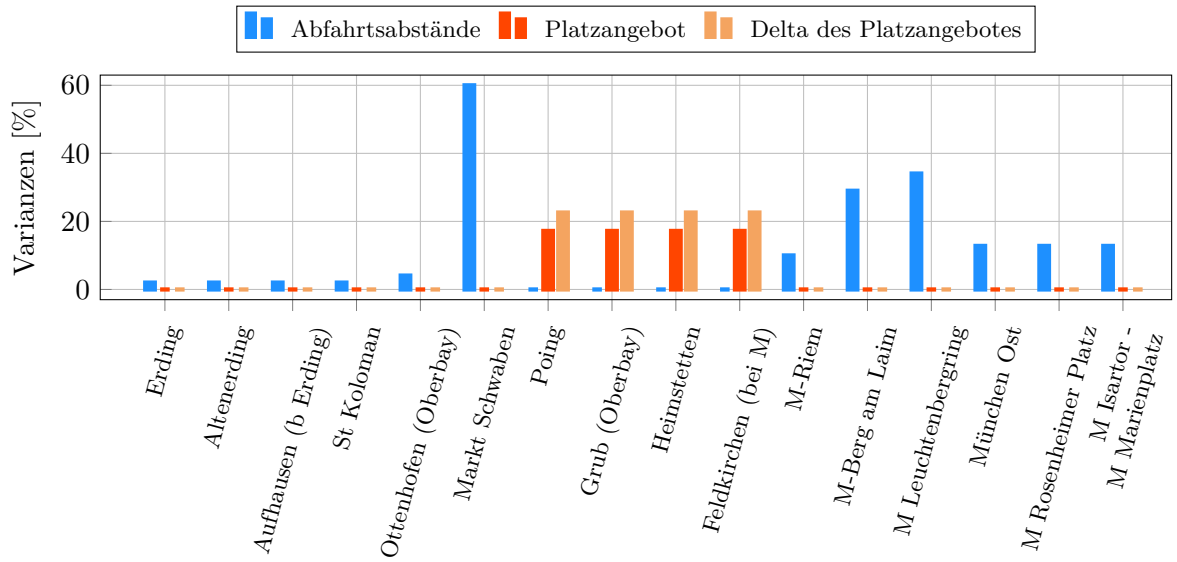

Abbildung A.5.19: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Erding - München Marienplatz in der HVZ.

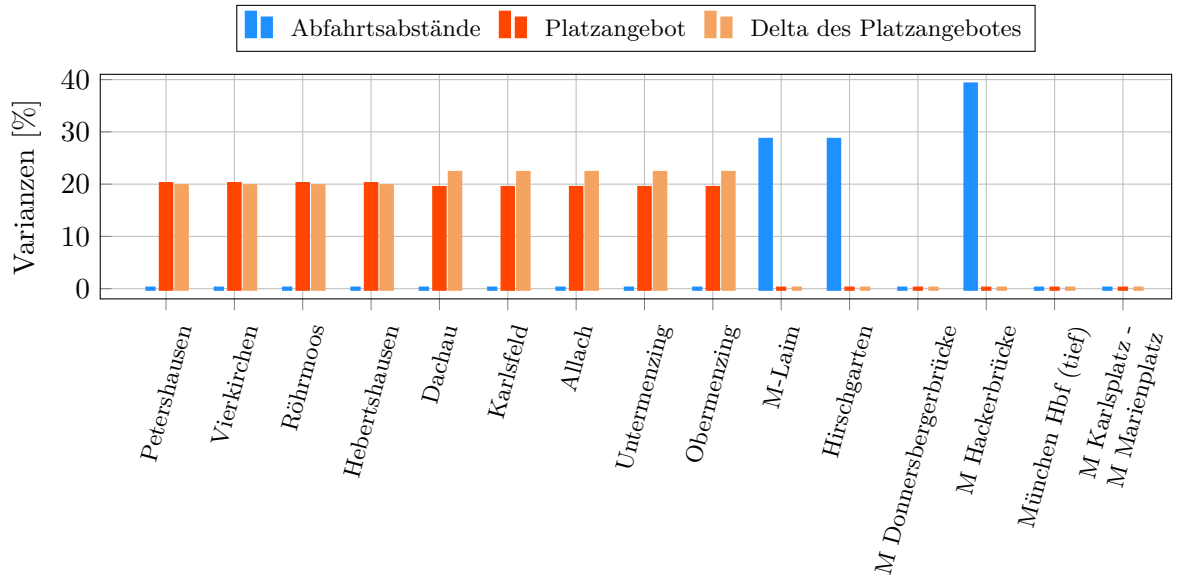

Abbildung A.5.20: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Petershausen - München Marienplatz in der HVZ.

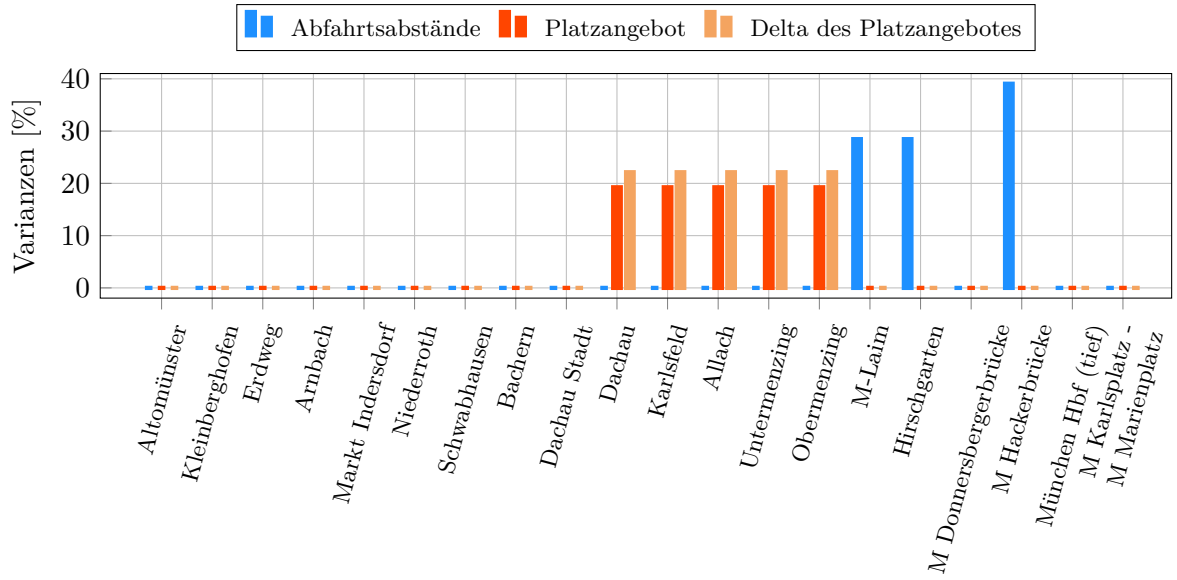

Abbildung A.5.21: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Altomünster - München Marienplatz in der HVZ.

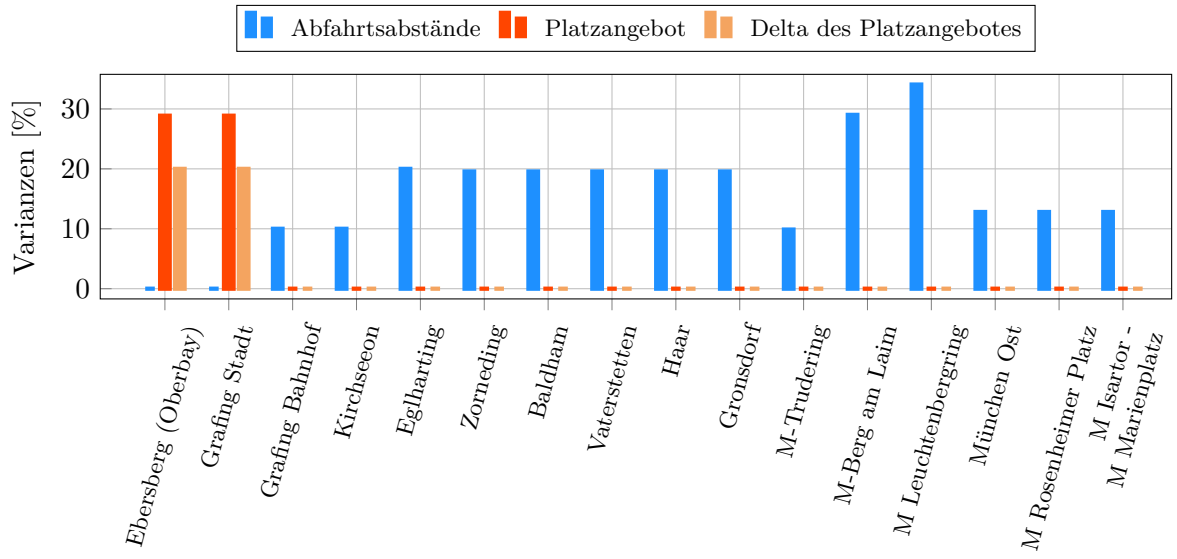

Abbildung A.5.22: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Ebersberg (Oberbay) - München Marienplatz in der HVZ.

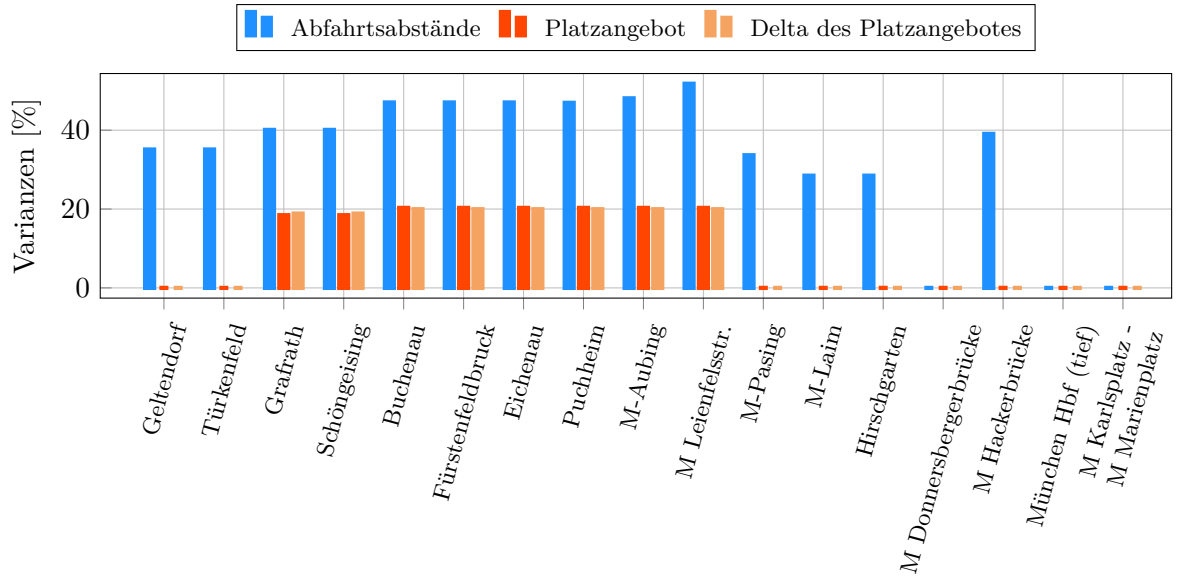

Abbildung A.5.23: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Geltendorf - München Marienplatz in der HVZ.

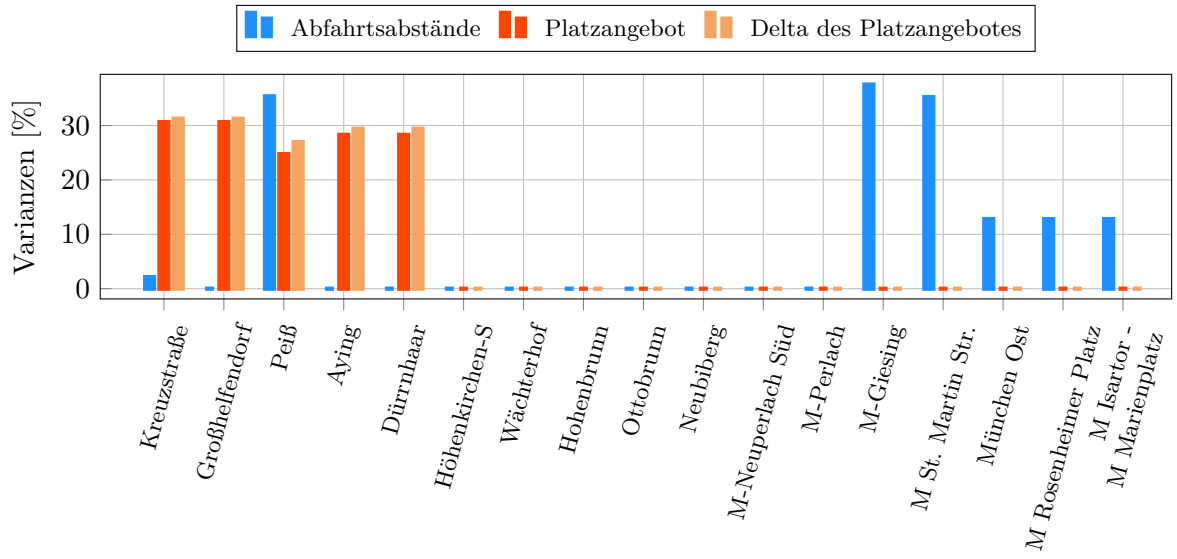

Abbildung A.5.24: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Kreuzstraße - München Marienplatz in der HVZ.

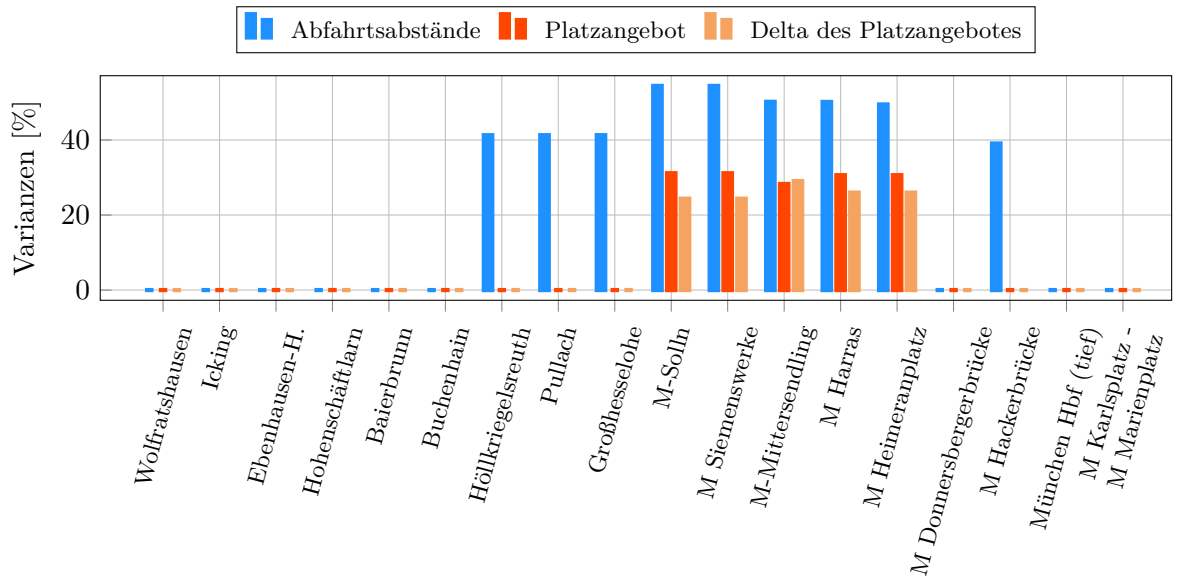

Abbildung A.5.25: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Wolfratshausen - München Marienplatz in der HVZ.

A.6. Réseau Express Régional im Großraum Paris

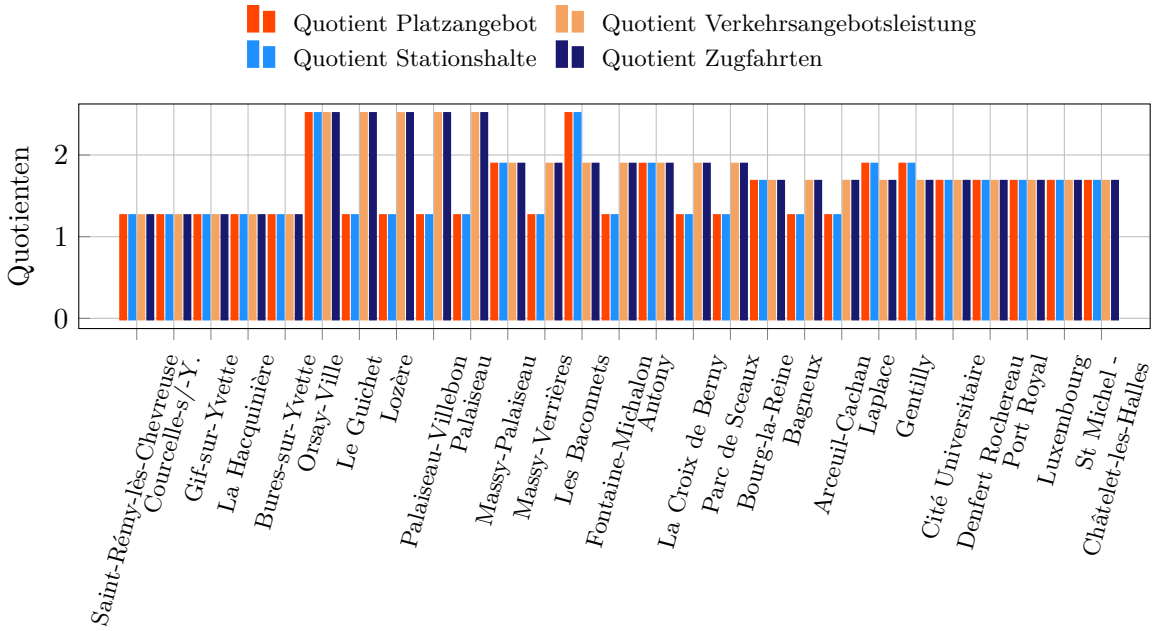

Abbildung A.6.1: Quotienten auf dem Ast Saint-Rémy-lès-Chevreuse - Châtelet-les-Halles.

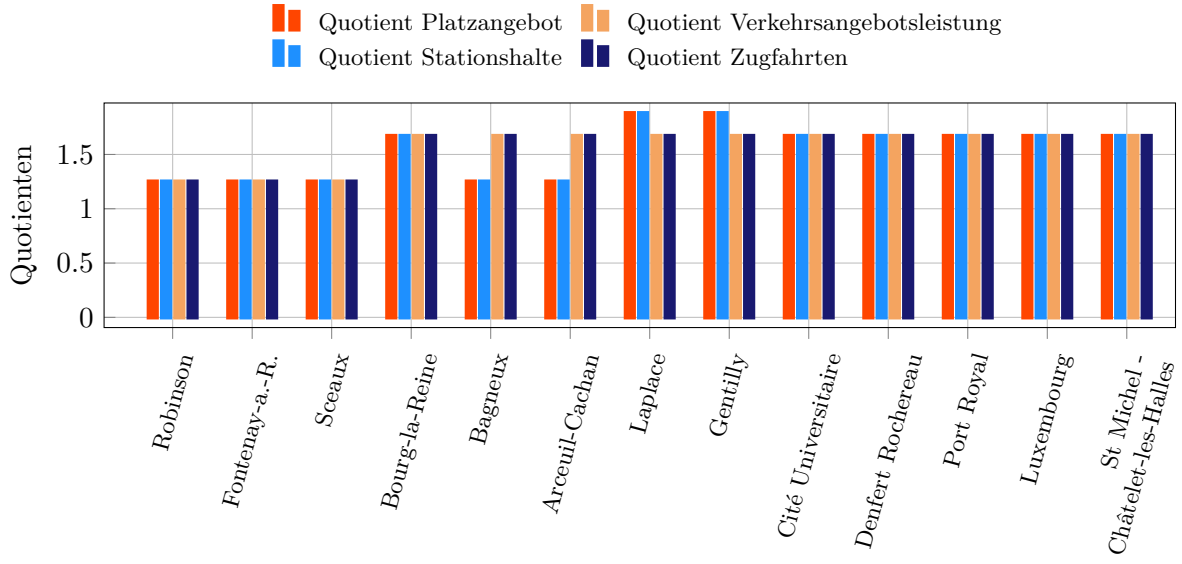

Abbildung A.6.2: Quotienten auf dem Ast Robinson - Châtelet-les-Halles.

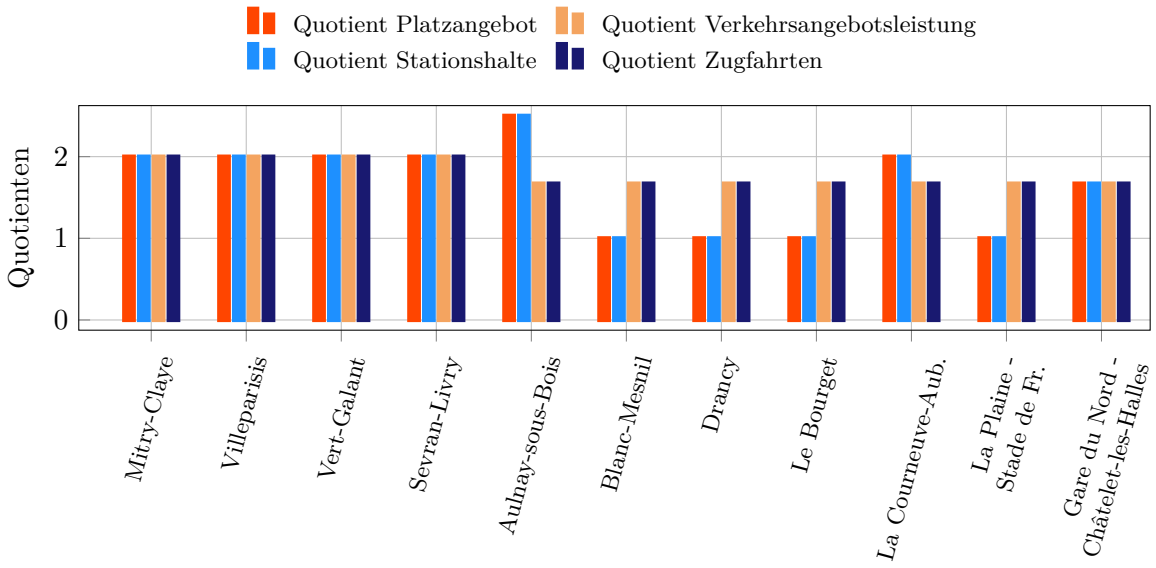

Abbildung A.6.3: Quotienten auf dem Ast Mitry-Claye - Châtelet-les-Halles.

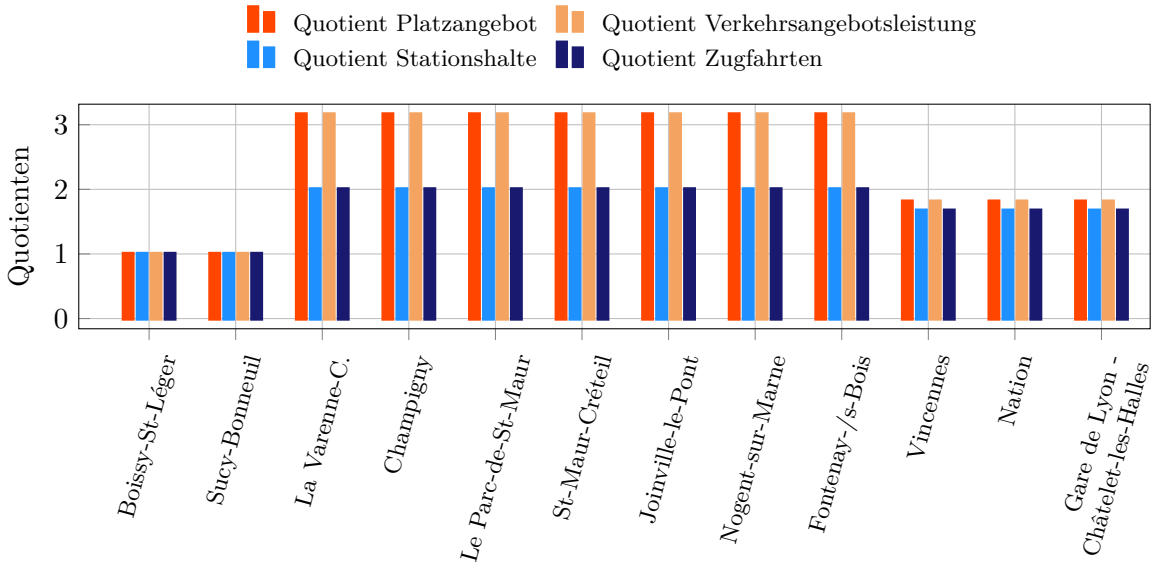

Abbildung A.6.4: Quotienten auf dem Ast Boissy-St-Léger - Châtelet-les-Halles.

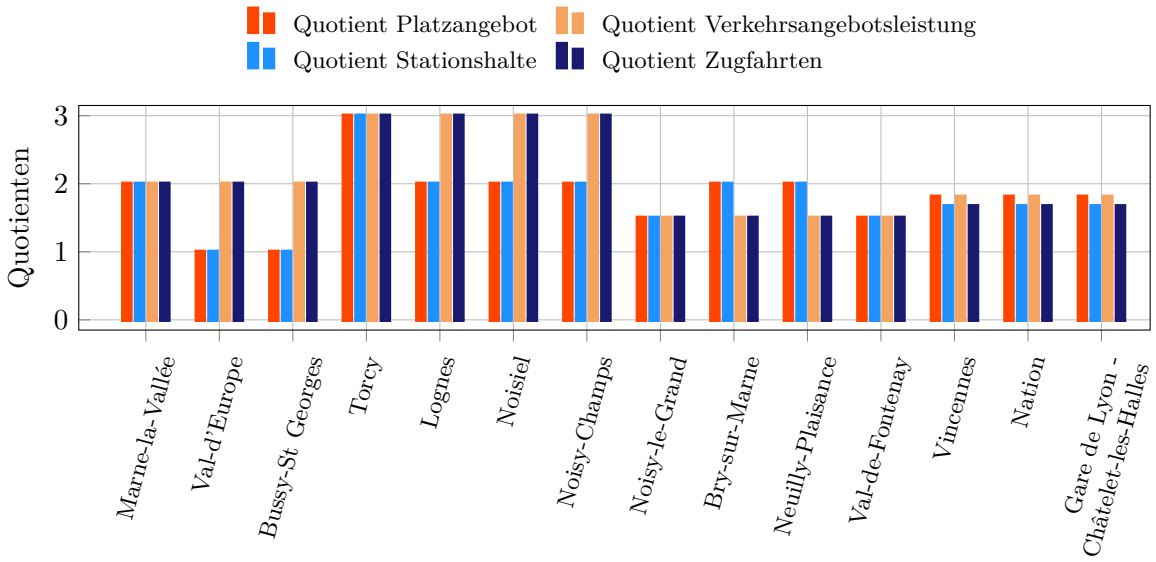

Abbildung A.6.5: Quotienten auf dem Ast Marne-la-Vallée - Châtelet-les-Halles.

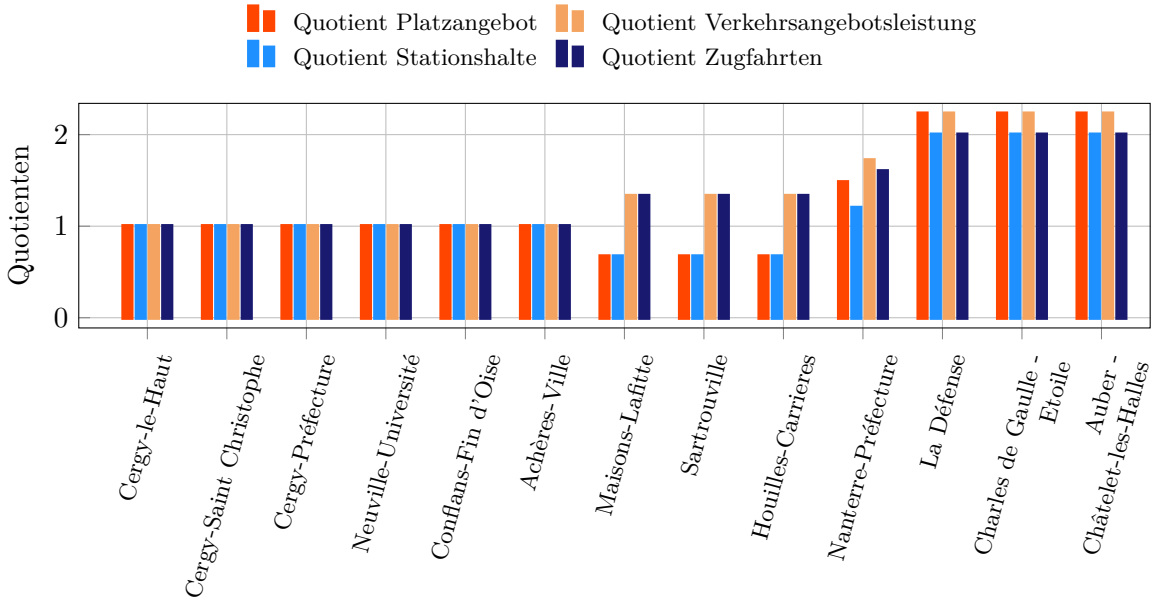

Abbildung A.6.6: Quotienten auf dem Ast Cergy-le-Haut - Châtelet-les-Halles.

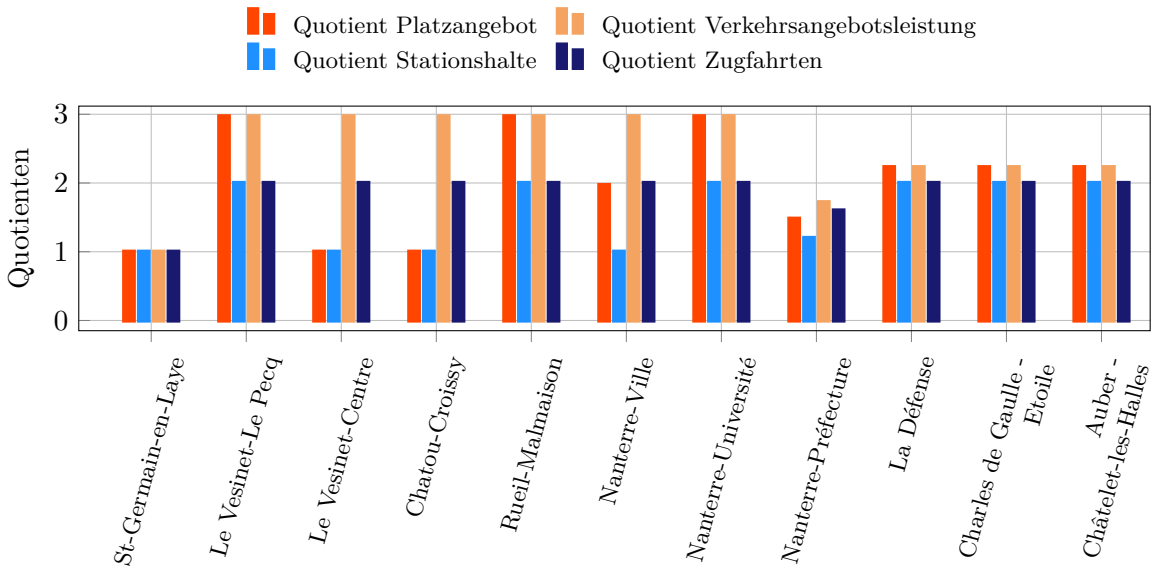

Abbildung A.6.7: Quotienten auf dem Ast St-Germain-en-Laye - Châtelet-les-Halles.

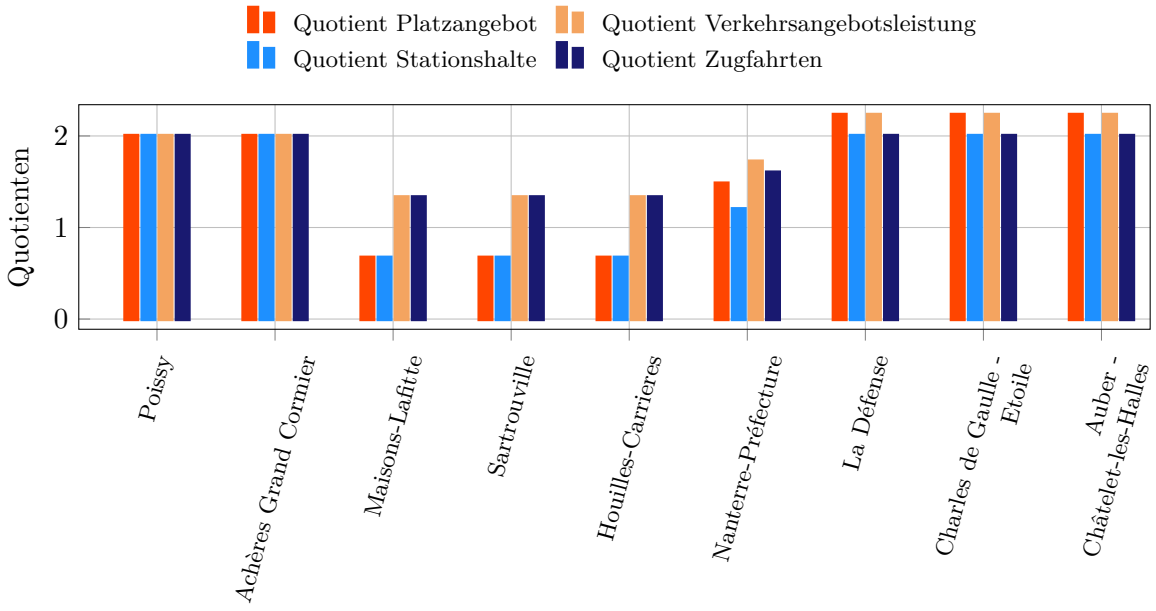

Abbildung A.6.8: Quotienten auf dem Ast Poissy - Châtelet-les-Halles.

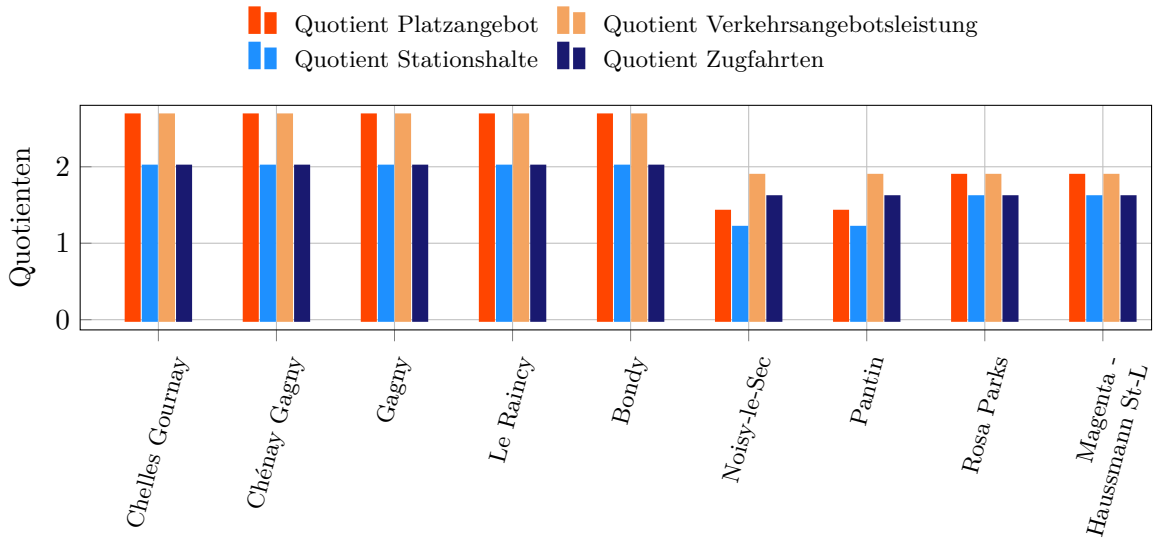

Abbildung A.6.9: Quotienten auf dem Ast Chelles Gournay - Haussmann Saint-Lazare.

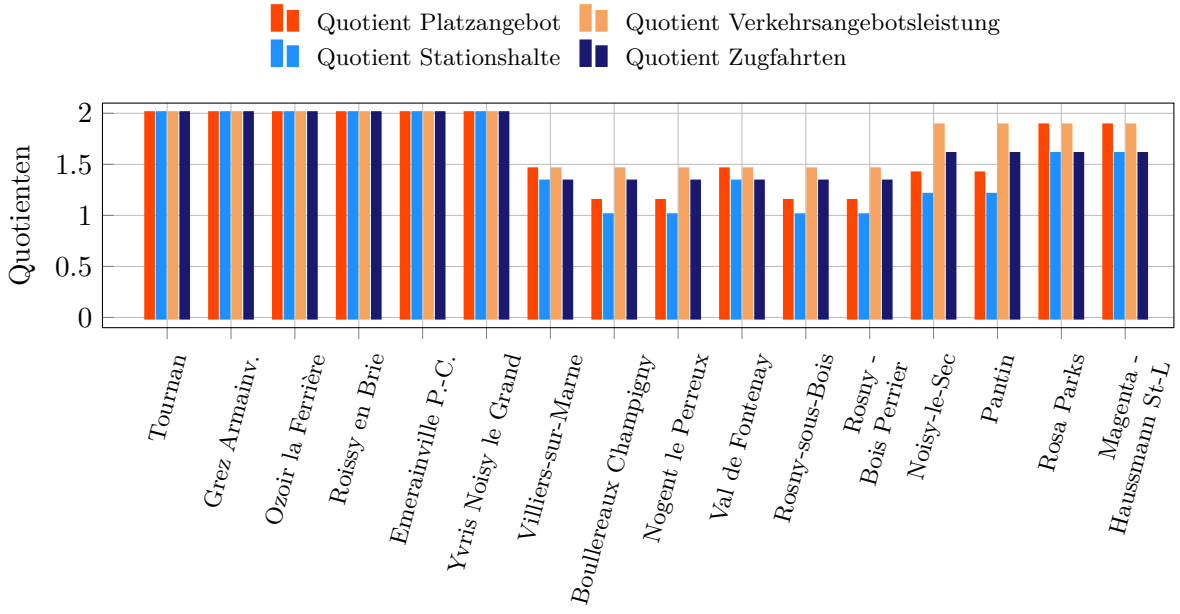

Abbildung A.6.10: Quotienten auf dem Ast Tournan - Haussmann Saint-Lazare.

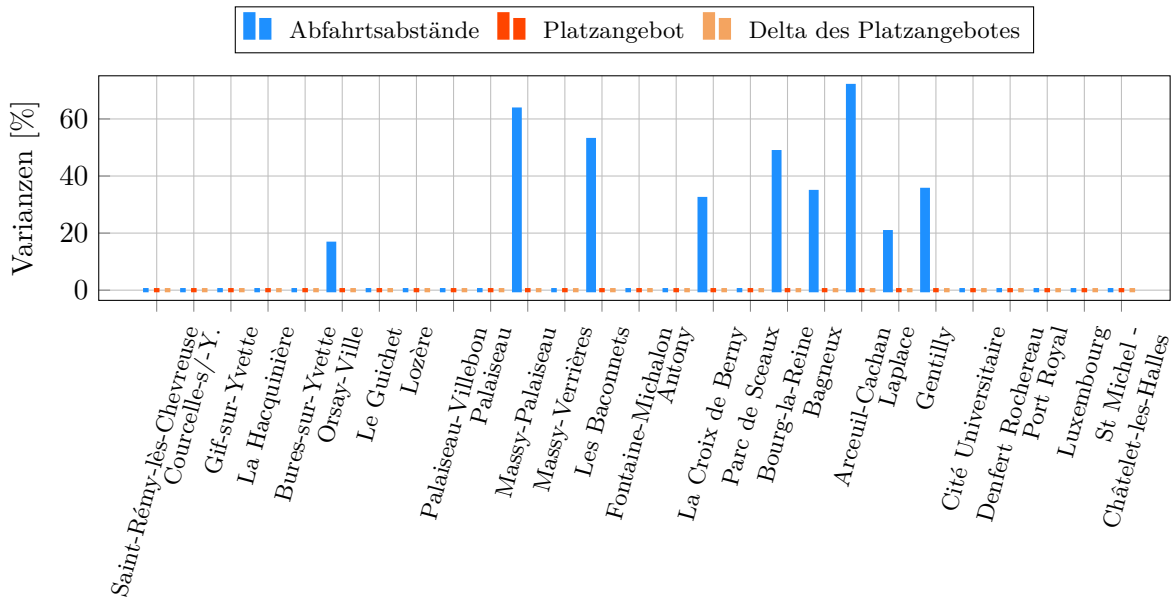

Abbildung A.6.11: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Saint-Rémy-lès-Chevreuse - Châtelet-les-Halles in der HVZ.

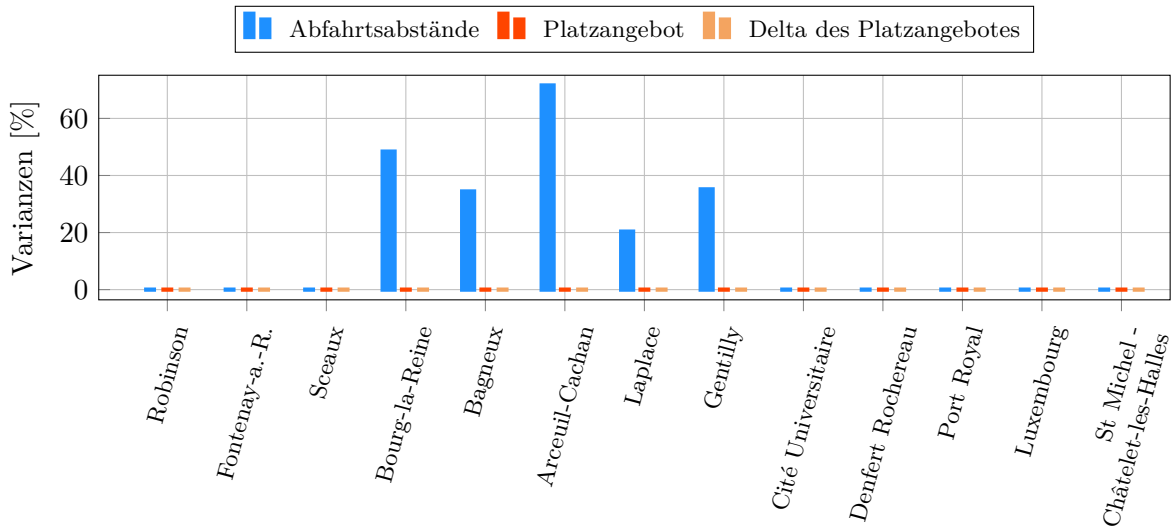

Abbildung A.6.12: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Robinson - Châtelet-les-Halles in der HVZ.

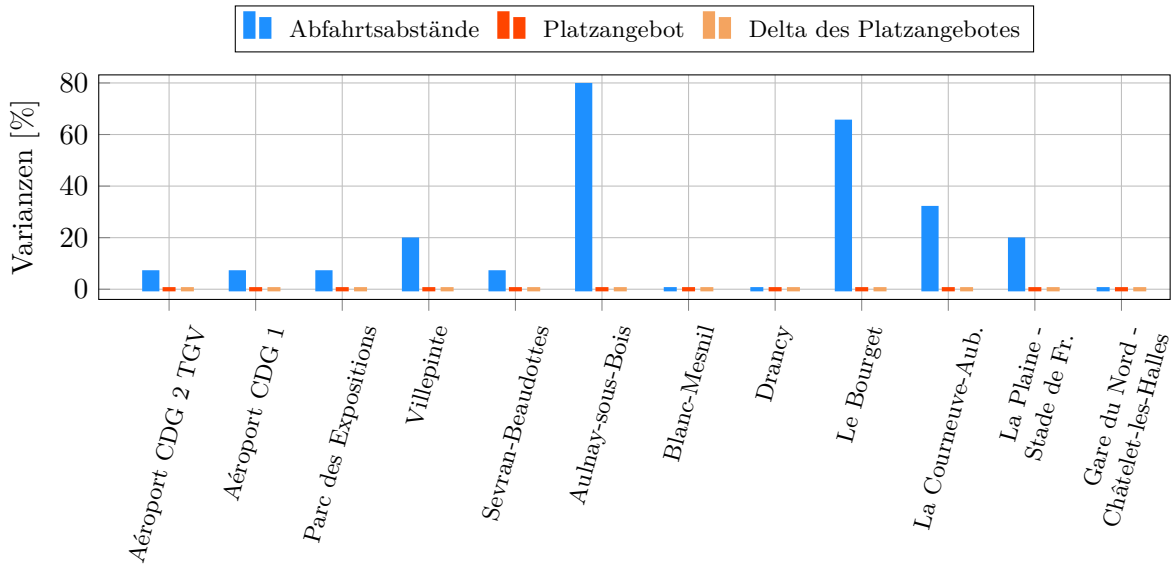

Abbildung A.6.13: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Aéroport Charles de Gaulle 2 TGV - Châtelet-les-Halles in der HVZ.

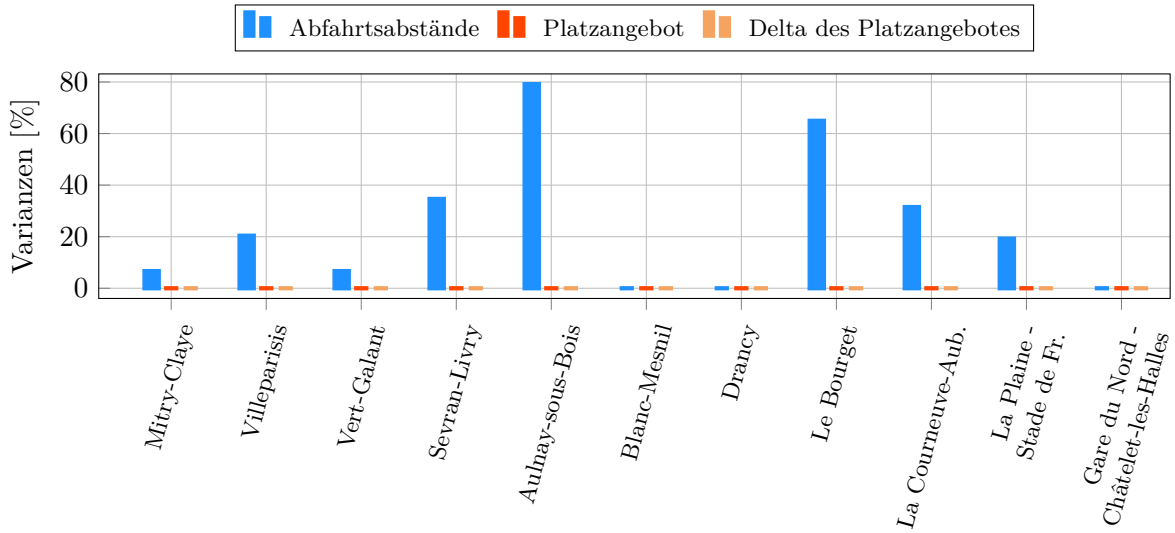

Abbildung A.6.14: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Mitry-Claye - Châtelet-les-Halles in der HVZ.

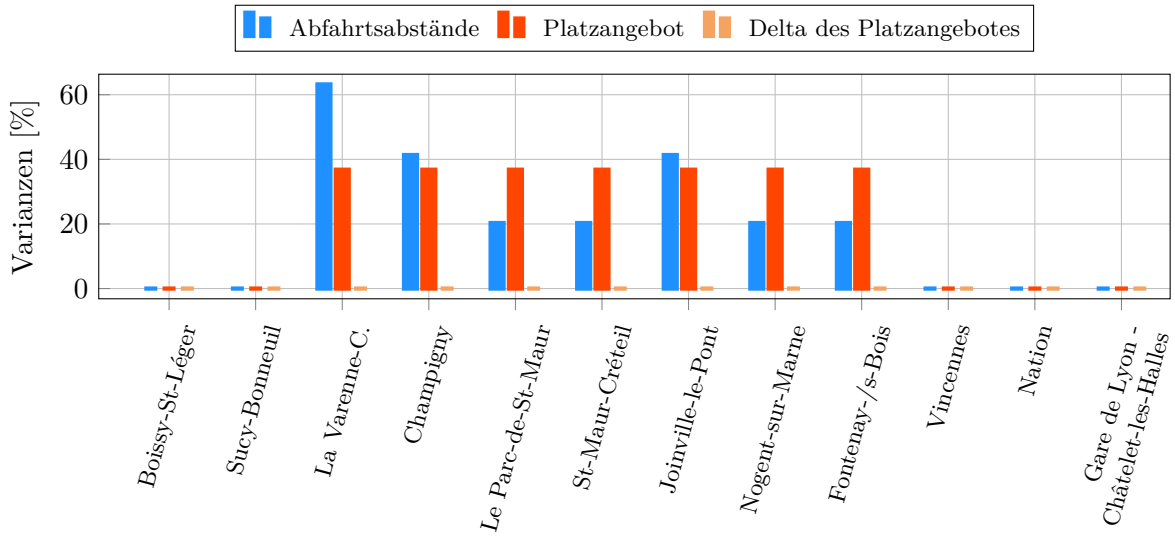

Abbildung A.6.15: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Boissy-St-Léger - Châtelet-les-Halles in der HVZ.

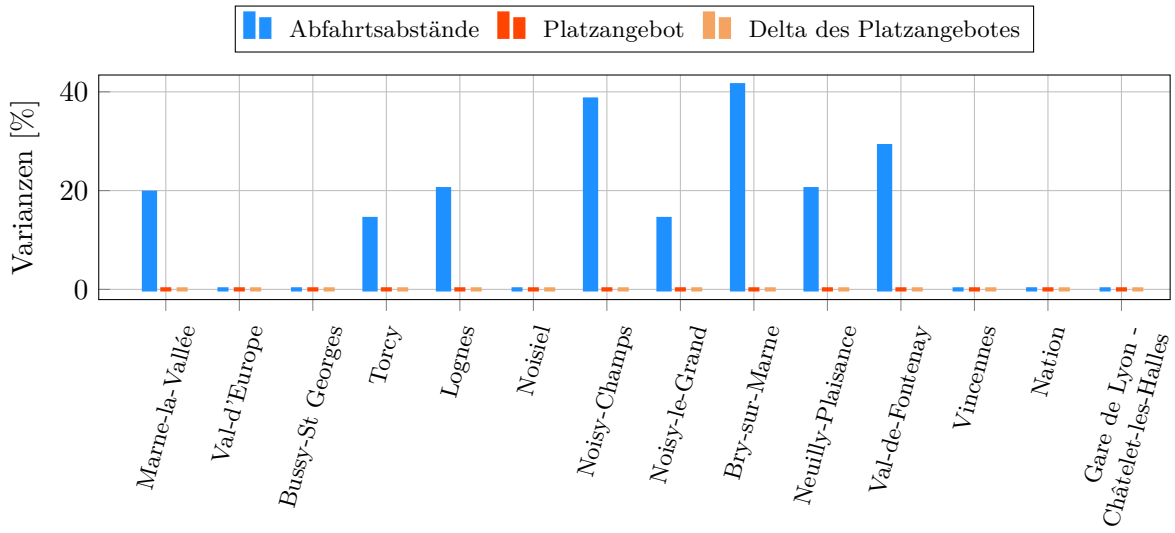

Abbildung A.6.16: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Marne-la-Vallée - Châtelet-les-Halles in der HVZ.

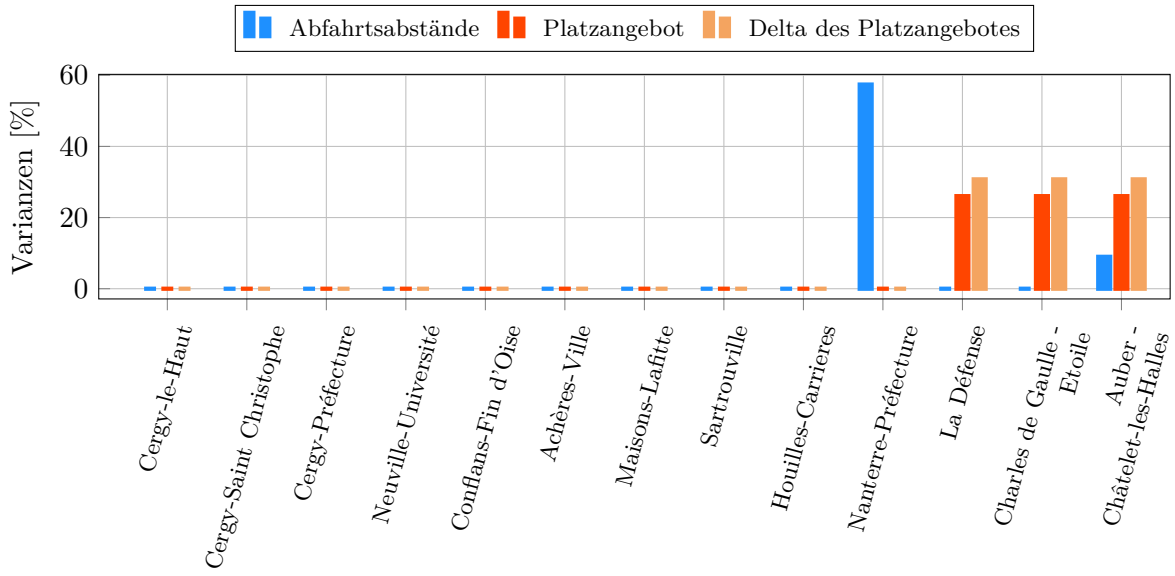

Abbildung A.6.17: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Cergy-le-Haut - Châtelet-les-Halles in der HVZ.

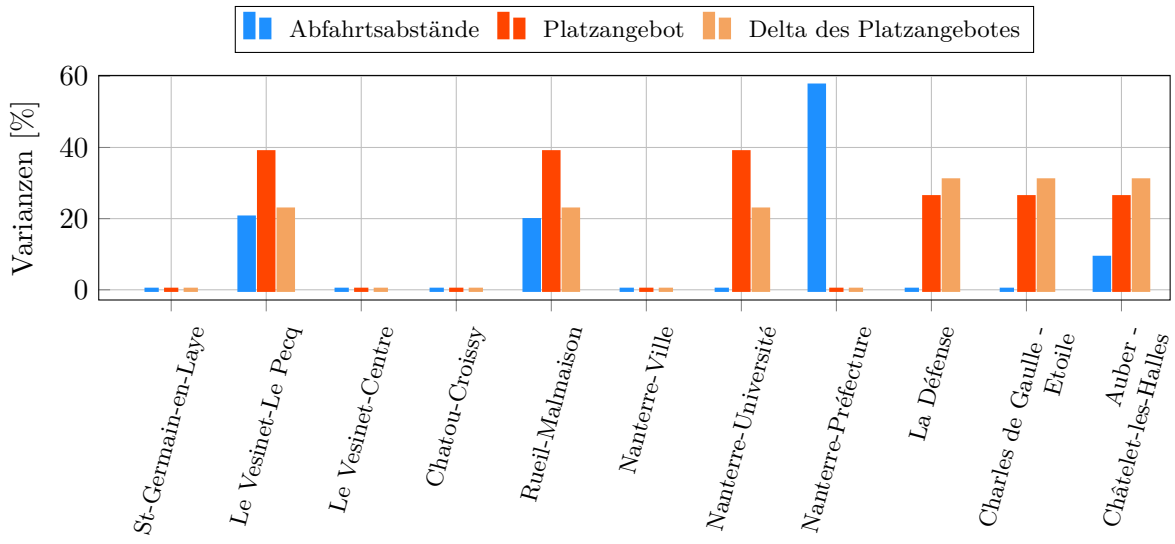

Abbildung A.6.18: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast St-Germain-en-Laye - Châtelet-les-Halles in der HVZ.

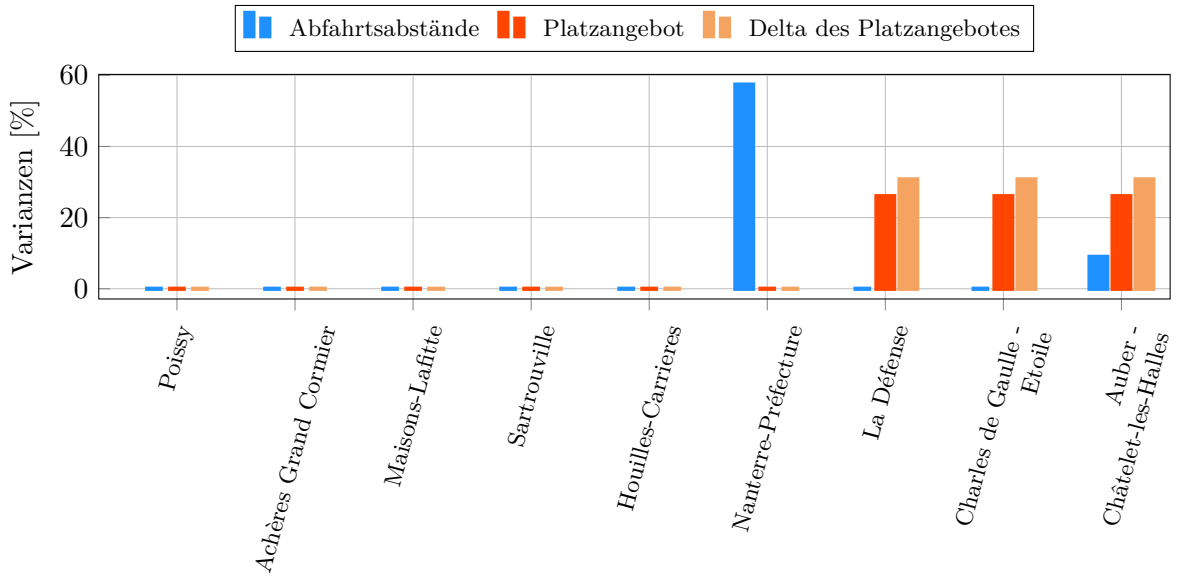

Abbildung A.6.19: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Poissy - Châtelet-les-Halles in der HVZ.

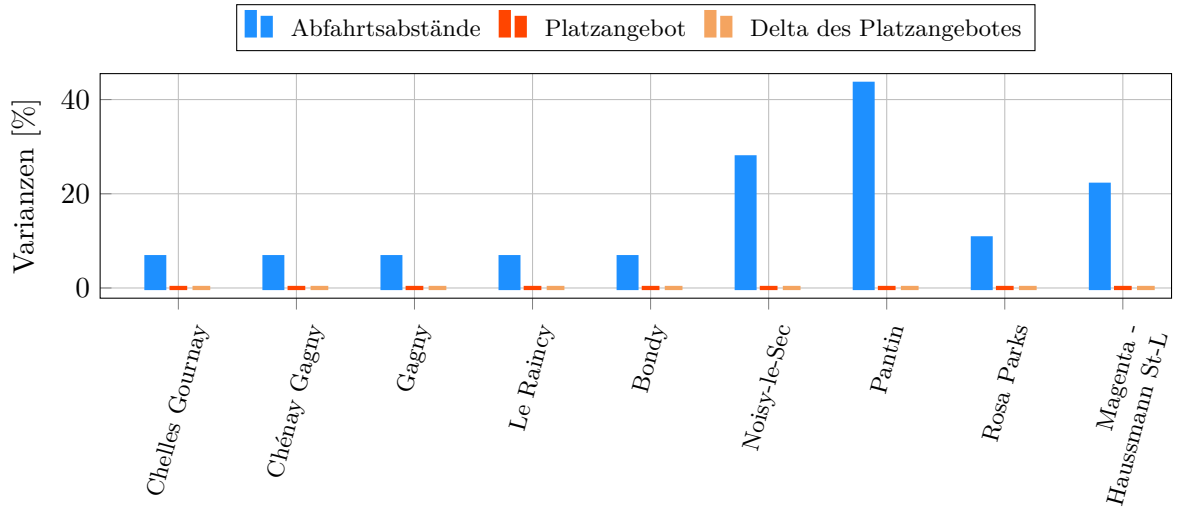

Abbildung A.6.20: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Chelles Gournay - Haussmann Saint-Lazare in der HVZ.

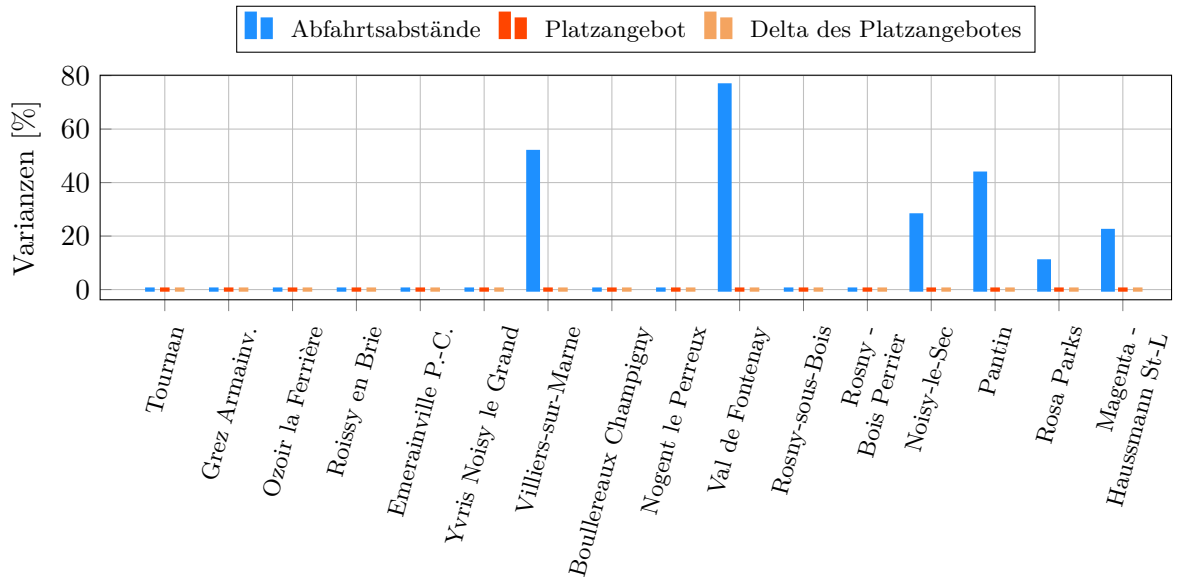

Abbildung A.6.21: Varianzen der Abfahrtsabstände und Platzangebote auf dem Ast Tournan - Haussmann Saint-Lazare in der HVZ.

B. Programmcode und Datenbankstruktur

Der in der methodischen Einleitung in Abschnitt 8 auf Seite 6 beschriebene Datenbankaufbau sowie der PHP-Code zur Auswertung werden hier beschrieben.

B.1. MySQL

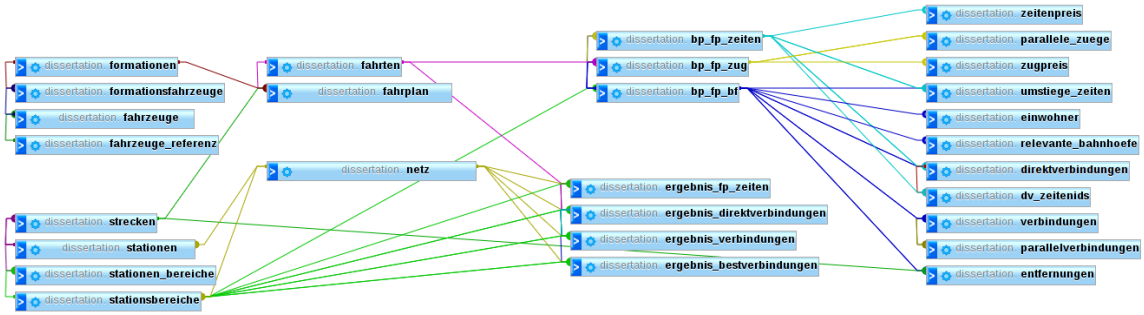

Abbildung B.1.1: Verwendete MySQL-Tabellen und ihr Zusammenhang.

Abbildung B.1.1 zeigt die verwendeten MySQL-Tabellen. Die Tabellen in der rechten Hälfte der Abbildung stammen dem von Friedrich (2017, S. 46ff.) entwickelten und von ihm ausführlich beschriebenen Aufbau. Die ergänzten Tabellen `ergebnis*` entsprechen im Aufbau den jeweiligen Tabellen von Friedrich und wurden ergänzt, um die Ergebnisse der für alle sieben Fallbeispiele nacheinander durchgeführten Berechnungen persistieren zu können.

Die Tabellen in der linken Hälfte werden nachfolgend kurz umrissen: Sämtliche Daten werden getrennt nach Netzen erhoben, die in der Tabelle `netz` mit einigen netzweiten Angaben (u. a. Länge der HVZ) definiert sind. Den Kern der Infrastruktur bildet die Tabelle `stationen`, die die Stationen der einzelnen Netze umfasst, auf die in der Tabelle `strecken` referenziert wird. Letztere enthält neben Referenz auf die Start- und Zielstation auch eine Länge sowie die Anzahl der Gleise und die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Für die Verbindungsanalyse ist eine Zusammenfassung der Stationen in Stationsbereiche (`stationsbereiche`) notwendig, welche über die Zuordnungstabelle `stationen_bereiche` erfolgt. Der importierte Fahrplan (Tabelle

`fahrplan`) referenziert die Strecken und Fahrten (Tabelle `fahrten`) und enthält die Abfahrts- bzw. Ankunftszeit an der Anfangs- und Endstation der referenzierten Strecke. Ferner enthält jeder Eintrag die Information über die eingesetzte Formation auf dem betreffenden Abschnitt sowie als Typ bezeichnet die Richtung (Lastrichtung oder Gegenrichtung) bzw. Verkehrszeit (hvz, nvz, beide) und als Art bezeichnet die Verkehrsart (kommerzielle Fahrt oder Leerfahrt). Die genannten Formationen, definiert in `formationen` setzen sich aus Fahrzeugen (`fahrzeuge`) zusammen und werden in der Zuordnungstabelle `formationsfahrzeuge` zusammengesetzt. Die Tabelle `fahrzeuge_referenz` enthält ferner die in Abschnitt 3.2.3.6 eingeführten Referenzfahrzeuge, die in der Tabelle `fahrzeuge` den einzelnen Fahrzeugen zugeordnet sind.

B.2. PHP

Das Skript setzt sich aus mehreren in Abbildung B.2.1 dargestellten Bausteinen zusammen, die je nach Stand der Bearbeitung und Änderungen der Eingangsdaten auch einzeln lauffähig sind. Das Skript baut sich aus mehreren ineinander liegenden Schleifen auf, mit denen auf oberster Ebene die einzelnen Netze und darunter die einzelnen in den blau umrandeten Kästen genannten Objekte durchlaufen werden. Anschließend werden netzweise die Ergebnisse aufbereitet in Tabellen und Diagrammen.

Den Abschluss bilden die vergleichenden Tabellen und Diagramme, die - im orange umrandeten Kasten dargestellt - mit den Werten aller Netze erzeugt werden. Hier entstehen die Skalen pro Beschreibungskriterium aus Minima und Maxima sowie die Einordnung der einzelnen Netze mit ihrem Median auf der Skala. Die Ausgabe der Diagramme und Tabellen erfolgt derart, dass sie in das LaTeX-Dokument eingebunden werden kann.

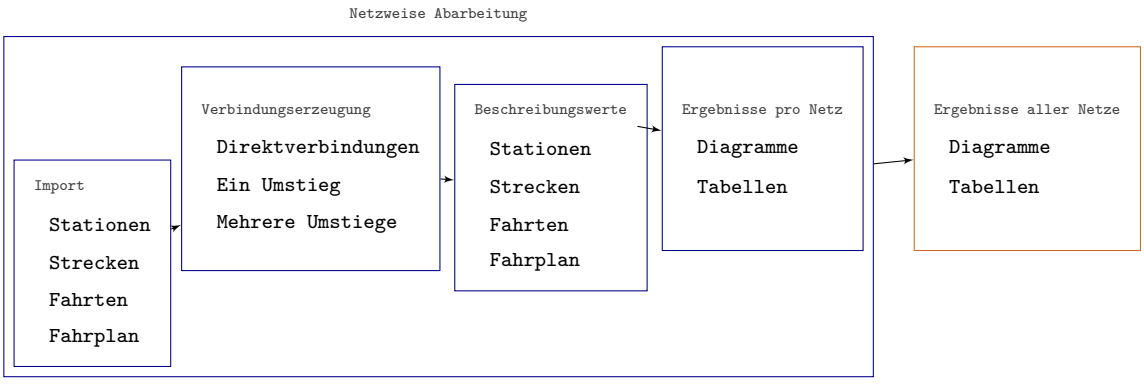

Abbildung B.2.1: Aufbau des PHP-Skriptes.